



Conception et évaluation des plans de surveillance basés sur le risque. Limitation des incertitudes qualité avec des ressources limitées de maîtrise

Belgacem Bettayeb

► To cite this version:

Belgacem Bettayeb. Conception et évaluation des plans de surveillance basés sur le risque. Limitation des incertitudes qualité avec des ressources limitées de maîtrise. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENI019 . tel-00859830

HAL Id: tel-00859830

<https://theses.hal.science/tel-00859830>

Submitted on 9 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Grenoble

Spécialité : **Génie Industriel : Conception et Production**

Arrêté ministériel : 7 aout 2006

Présentée par

Belgacem BETTAYEB

Thèse dirigée par **Michel TOLLENAERE**
et encadrée par **Samuel BASSETTO**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP (Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble - UMR5272)**
et de l' **École doctorale I-MEP2 (Ingénierie - Matériaux Mécanique Énergétique Environnement Procédés Production)**

Conception et évaluation des plans de surveillance basés sur le risque

Limitation des incertitudes qualité avec des ressources limitées de maîtrise

Thèse soutenue publiquement le **26 juin 2012**,
devant le jury composé de :

Mr, Jean-Marie FLAUS

Professeur, Université de Grenoble, France, Président

Mr, Daoud AIT-KADI

Professeur, Université Laval, Canada , Rapporteur

Mr, Damien TRENTESAUX

Professeur, Université de Valenciennes, France, Rapporteur

Mr, Claude YUGMA

Maître de Conférences, École des Mines de Saint-Étienne, France, Examineur

Mr, Philippe VIALLETTELLE

Ingénieur, ST Microelectronics de Crolles, France, Examineur

Mr, Michel TOLLENAERE

Professeur, Université de Grenoble, France, Directeur de thèse

Mr, Samuel BASSETTO

Professeur adjoint, École Polytechnique de Montréal, Canada, Encadrant de thèse

Mr, Faouzi MASMOUDI

Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie, Invité



*« La difficulté ne réside pas dans l'effort fourni
pour atteindre un objectif cher, la plus grande
difficulté est l'absence d'objectif »*

Proverbe arabe.

À mes parents Mohamed et Aïcha
À mes frères et mes soeurs
À ma femme et à ma fille Asma

Belgacem Bettayeb, juin 21012.

REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse ont été effectués au sein du laboratoire G-SCOP (Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production) à Grenoble.

Mes premiers remerciements vont à mes encadrants de thèse à qui je souhaite exprimer toute ma gratitude :

- Mr. Michel Tollenaere, Professeur à l'Université de Grenoble, qui a dirigé cette thèse, pour sa confiance, ses encouragements et ses conseils avisés.
- Mr. Samuel Bassetto, Professeur adjoint à l'École Polytechnique de Montréal, qui en tant qu'encadrant de thèse, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible durant la réalisation de cette thèse. Ses remarques, ses critiques et ses recommandations étaient déterminantes dans l'enchaînement des idées et des contributions de cette thèse.

J'adresse mes chaleureux remerciements à Mr. Philippe Vialletelle, Ingénieur Principal à ST Microelectronics de Crolles, avec qui nous avons collaboré dans le cadre du projet IMPROVE et avec qui j'ai eu la chance de beaucoup échanger à travers des discussions enrichissantes qui ont fortement contribué aux résultats obtenus. Son professionnalisme et son expérience m'étaient d'une très grande aide. Qu'il trouve ici toute mon estime et toute ma reconnaissance.

Mes remerciements les plus sincères vont aux membres de mon jury :

- Mr. Jean-Marie Flaus, Professeur à l'Université de Grenoble, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant mon jury de thèse.
- Mr. Damien Trentesaux, Professeur à l'Université de Valenciennes, et Mr. Daoud Aït-Kadi, Professeur à l'Université Laval, qui m'ont honoré en acceptant d'évaluer mon travail, pour l'intérêt et le temps qu'ils ont consacré pour rapporter sur mon mémoire de thèse.
- Mr. Faouzi Masmoudi, Professeur à l'Ecole National d'Ingénieur de Sfax, pour avoir accepté de faire parti de mon jury et d'examiner mon mémoire.
- Mr. Claude Yugma, Maître de conférences à l'École des Mines de Saint-Étienne, pour sa participation au jury en tant qu'examineur et pour sa collaboration dans le cadre du projet IMPROVE.

Je souhaite également remercier Mr. Yannik Frein, directeur du laboratoire G-SCOP, et tout le personnel du laboratoire pour leur accueil et pour l'ambiance conviviale et propice au travail que j'ai senti pendant toute la durée de ma thèse.

Merci à mes deux collègues de bureau Samuel et Christophe et à tous mes collègues du laboratoire pour leur gentillesse et pour les bons moments passés ensemble.

Un grand merci à mon ami M'hamed pour le travail effectué ensemble et pour son soutien infaillible depuis mon arrivée à Grenoble.

Enfin, merci à tous ceux que je n'ai pas pu citer, qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	i
TABLE DES FIGURES	ii
LISTE DES TABLEAUX	iv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre 1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	5
Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE	23
Chapitre 3 UN POINT DE VUE ASSURANTIEL DE CONCEPTION DES PLANS DE SURVEILLANCE	53
Chapitre 4 TESTS ET DISCUSSIONS SUR UN CAS INDUSTRIEL	89
Chapitre 5 VERS UN MODÈLE GÉNÉRALISÉ : MULTI-RISQUES, MULTI-COUCHES DE PROTECTION	105
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	127
BIBLIOGRAPHIE	140
Annexe A LE PROJET EUROPÉEN IMPROVE	145
Annexe B LA MÉTHODE AMDEC	151
Annexe C LES PREUVES DES PROPRIÉTÉS ET DES COROLLAIRES	157

Table des figures

1.1	Processus de fabrication des circuits intégrés	9
1.2	Modèle de flux de processus de la technologie CMOS	12
1.3	Répartitions des opérations de procédés de la technologie CMOS sur les différents ateliers de l'usine « Front-End »	12
1.4	Différents usages des mesures effectuées sur les plaquettes	17
1.5	Plan de surveillance et contrôle de processus	19
1.6	Le processus de mesure des paramètres de contrôle	20
2.1	Le contrôle de processus	26
2.2	Le document Plan de surveillance	28
2.3	Les trois phases d'un plan de surveillance	30
2.4	Illustration du théorème central limite	37
2.5	Deux formes de dérive d'un processus	39
2.6	Illustration de la fonction de pertes de Taguchi et de l'importance de centrage du processus	40
2.7	Carte de contrôle de la moyenne	41
2.8	Quatre types des mesures pour inspecter le produit et le processus	46
3.1	Les brèches locales et globales des plusieurs couches de dispositifs de contrôles	57
3.2	Évolution du MAR et exemple de valeur ajouté de plan de sur- veillance	60
3.3	Approche en deux étapes	66
3.4	Illustration des tolérances d'échantillonnage	68
3.5	Évolution du nombre total des contrôles et du taux d'échantillon- nage moyen par opération en fonction de R_L pour différentes va- leurs de %CAPA	80
3.6	Évolution des taux d'échantillonnage moyens par opération en fonc- tion de R_L du point de vue produit et du point de vue outil pour différentes valeurs de %CAPA	81
3.7	Effets de %CAPA sans et avec politique assurantielle	82
3.8	MAR_{max} estimé en fonction de R_L avec 30%CAPA	83
3.9	Deux paramètres de contrôle de MAR dans les cas sans délais et sans contraintes sur les nombres de contrôles	84
3.10	Evolution du MAR et rôle du WL dans le cas avec délais fixe	86

3.11	Exemple d'évolution de MAR en présence de délais de mesure et des paramètre de contrôle WL et IL	87
4.1	La dimension critique (CD) illustrée sur une partie d'une image, obtenue par la technique MEB, d'une plaquette	91
4.2	Configuration des ateliers	93
4.3	Modèle de MAR en présence d'un délai entre fabrication et mesure	95
4.4	Méthode d'expérimentation	96
4.5	Le principe du simulateur d'échantillonnage à partir des historiques de fabrication et de mesure CD	98
4.6	Variations du MAR réel et simulé par outil	103
4.7	Récapitulatif des 3 instances	104
5.1	Les entrées d'un plan de surveillance basé sur le risque	108
5.2	Les variables de décision du plan de surveillance global	116
5.3	Modèle générique du MAR	118
5.4	Cas de R_L dynamique	131
5.5	Approche stochastique pour le calcul de risque opérationnel	132
A.1	Les Worpackages du projet IMPROVE	146
A.2	La tâche WP4.2	149
B.1	Tableau d'analyse AMDEC	153
C.1	Deux cas possibles pour t_i^{-u}	158
C.2	MAR optimal dans le cas avec délai de mesure constant	159
C.3	MAR^x et $MAR^{x'}$	161

Liste des tableaux

1.1	Parts de marché des semi-conducteurs (année 2010) dans divers secteurs	8
3.4	Analogie entre PCPS et 0-1KP	65
3.5	Instance de l'exemple illustratif	73
3.6	Résultats de l'étape 1	74
3.7	Résultats de l'étape 2 à l'itération 1	74
3.8	Résultats de l'étape 2 à l'itération 2	75
3.9	Résultats de l'étape 2 à l'itération 3	75
3.10	Résultats de l'étape 2 à l'itération 4	76
3.11	Résultats de à la fin de l'étape 2	76
3.12	Récapitulatif et résultat final de l'heuristique	77
3.13	Comparaison de la solution heuristique (<i>HA</i>) avec la solution optimale (<i>OA</i>)	78
3.14	Instance de l'analyse des effets des paramètres R_L et $CAPA$	79
3.15	Effet de l'approche assurantielle lorsque la capacité de contrôle est faible (30% $CAPA$)	80
4.1	Les ressources matérielles prises en considération	93
4.2	Caractéristiques des outils de fabrication	93
4.3	Les trois instances expérimentées	99
4.5	Résultats moyennes des trois indicateurs pour les trois instances . .	102

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie des semi-conducteurs, et la micro-électronique de façon générale, est l'épine dorsale des innovations qui permettent la fabrication de nombreux nouveaux produits allant des produits de consommation jusqu'aux applications industrielles, aux domaines de l'automobile, des télécommunications, de la médecine, de la bureautique et bien d'autres. De plus, les semi-conducteurs sont des matières premières nécessaires au développement des technologies qui aident à faire face à d'importants défis sociaux tels que le changement climatique, les pénuries d'énergie, les questions sécuritaires et la santé.

Les évolutions qu'a connues cette industrie ont toujours été des événements dépendants et souvent précurseurs des avancées technologiques dans différents domaines en forte relation avec la recherche fondamentale et appliquée. En particulier, le « génie industriel » a joué et joue encore un rôle fondamental pendant le cycle de vie d'un produit micro-électronique depuis l'analyse du besoin jusqu'à la mise en rebut et/ou le recyclage.

Les produits micro-électroniques de nos jours sont de plus en plus intelligents, de plus en plus puissants,... et de moins en moins chers. L'augmentation exponentielle de la complexité des composants à base de semi-conducteurs a permis d'avoir de tels produits, mais en même temps a amené les industriels à faire face à de nouveaux défis liés à la conception et à l'industrialisation. Un autre défi auquel l'industrie des semi-conducteurs fait face concerne la durée, relativement courte, de la production d'une technologie de produits micro-électroniques qui est de l'ordre de 3 ans au maximum. La mise sur le marché d'un nouveau produit doit être rapide, en garantissant la meilleure qualité et les meilleurs prix, pour faire face à une concurrence de plus en plus rude. La compétitivité d'une entreprise dans ce secteur, comme dans tout autre secteur, passe donc par une maîtrise parfaite de son système de production dans ses dimensions technologique, fonc-

tionnelle, organisationnelle et humaine, essence du génie industriel.

Dans le but de maintenir sa compétitivité, un industriel du semi-conducteur doit être capable de trouver des solutions pour diminuer continuellement le coût par fonction tout en réduisant le temps de cycle et améliorer l'efficacité des équipements de fabrication tout en préservant son environnement. La variabilité étant considérée comme l'inverse de la qualité, sa maîtrise est donc synonyme de la maîtrise de la qualité des produits et des processus [Pillet, 2005].

Classiquement, la maîtrise de la variabilité des processus industriels est fondé sur un processus de mesure, qui utilise des moyens selon un plan prédéfini appelé plan de surveillance. Ces mesures, quelles que soient leurs natures (physiques, visuel, etc.), sont nécessaires pour détecter les variations anormales et entreprendre les actions nécessaires pour en éliminer les causes et remédier aux effets néfastes.

Un contrôle est donc un processus qui ne se limite pas à l'étape de mesure qui est effectuée sur le produit ou sur les paramètres de processus de fabrication. Les autres étapes dans ce processus sont l'analyse des données obtenues par les mesures, le diagnostic (si détection d'anomalie) pour trouver les causes et décider des actions à exécuter sur le processus de fabrication pour le remettre dans les conditions normales de fonctionnement ou l'améliorer.

« Contrôler plus pour plus de qualité » semble donc une bonne formule pour maîtriser la qualité de produit et la qualité de processus. Toutefois, cette formule est très simpliste, voire inappropriée, dans un contexte économique où la satisfaction du client comporte aussi des aspects coût, délai et volume. Ce dernier aspect est crucial dans tous les secteurs industriels de fabrication en masse comme celui des semi-conducteurs. En effet, un client dans ce secteur (généralement des fabricants de produits microélectroniques) peut être fortement pénalisé si les quantités des produits (puces) qu'il a commandées ne sont pas garanties dans un délai raisonnable car, lui aussi, il est contraint de faire face à la concurrence en essayant de capter, le plus rapidement possible, le plus grand part du marché d'une nouvelle technologie. Il est donc essentiel pour un fabricant de semi-conducteur de prouver à ses clients l'aptitude de son système de production à fournir des grands volumes des produits dans des délais courts sans que ça soit au détriment de la qualité ni du coût.

D'autre part, les coûts, parfois très élevés, des équipements de production pressent les industriels à maximiser leur disponibilité et à réduire le temps de cycle de fabrication pour réduire les coûts et les délais. Augmenter arbitrairement les contrôles a un effet secondaire négatif sur les critères de productivité, bien

qu'ils y jouent un rôle préventif et correctif. De plus, les ressources de contrôle présentent des contraintes de capacité et d'aptitude qui sont aussi à prendre en compte. Il y a donc un équilibre à trouver entre deux besoins contradictoires : la disponibilité des mesures et la productivité.

Cette thèse traite un des aspects de l'amélioration de l'efficacité des équipements de production qui concerne la maîtrise des risques qualité par une planification rationnelle des contrôles qualité qui tienne compte de la limitation des équipements de contrôle et des caractéristiques de l'ensemble des ressources de production. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet européen IMPROVE¹ (voir détail dans annexe A) qui vise à développer des solutions pour améliorer la qualité du processus tout en améliorant l'efficacité des équipements de production des industriels européens de semi-conducteurs.

Ce mémoire de thèse est structuré de la façon suivante :

Le chapitre 1 présente le cadre général de la thèse et dresse la problématique qui motive ces travaux de recherche.

Le deuxième chapitre présente une revue de littérature sur les techniques et outils de contrôles de processus en discutant leurs limites vis-à-vis de la problématique étudiée dans cette thèse.

Notre approche de conception des plans de surveillance basés sur le risque est présentée dans le chapitre 3. D'abord, les motivations pour une telle approche sont expliquées. Ensuite, une formalisation simplifiée de l'approche et notre proposition de résolution sont présentées et illustrées à travers des exemples. Des analyses des sensibilités de la méthode de résolution face à certains paramètres du modèle sont menées à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 4 est consacré à une étude de cas industriel à travers lequel nous avons testé notre approche avec des données réelles. La méthode d'expérimentation, utilisée pour analyser l'apport d'un plan de surveillance basé sur le risque, et ses limites sont exposées. Les résultats montrent les avantages prévisibles de l'approche que nous proposons pour mieux maîtriser les risques avec des ressources limitées de maîtrise.

Le dernier chapitre (5) est une vision globale de la conception des plans de surveillance d'un processus de fabrication constitué, dans son modèle des flux, de plusieurs couches de protection contre plusieurs sources de risques opérationnelles. Un modèle générique de l'évolution du risque opérationnel est présenté

1. Implementing Manufacturing science solutions to increase equipment productivity and fab performance

pour quantifier la valeur ajoutée d'un plan de surveillance quelconque vis-à-vis de ce risque. Quelques formalisations généralisées sont présentées quant au problème de conception des plans de surveillance pour différents objectifs possibles liés aux performances de l'activité de contrôle de processus.

Chapitre 1

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Sommaire

1	Introduction	7
2	L'industrie des semi-conducteurs	7
3	La fabrication des puces	8
4	Le processus de fabrication de « Front-end »	9
4.1	Les principales phases de fabrication	9
4.2	Exemple : processus de fabrication de la technologie CMOS	11
4.3	Caractéristiques de l'usine de fabrication	11
5	L'importance des mesures	13
5.1	Sources des mesures	13
5.2	Utilisation de mesures effectuées sur les plaquettes	16
6	La problématique	17
7	Conclusion du chapitre 1	20

1 Introduction

Cette thèse a été effectuée dans le cadre d'un projet européen impliquant des industriels des semi-conducteurs. Pour cela, ce chapitre présente ce secteur industriel et les spécificités de son processus de fabrication. En particulier, la diversité des mesures effectuées sur le processus et leurs rôles dans le contrôle de processus sont exposés. La deuxième partie du chapitre présente la problématique et les questions de recherche qui émanent de la question de maîtrise de processus dans un tel contexte.

2 L'industrie des semi-conducteurs

Depuis l'invention du premier transistor dans les laboratoires Bell¹, vers la fin des années 40, l'industrie des semi-conducteurs n'a pas cessé d'évoluer de façon très rapide. Chaque avancée a été à l'origine des nouvelles technologies qui ont changé le monde.

L'industrie des semi-conducteurs est un secteur industriel qui regroupe les activités de conception, de fabrication et de commercialisation des puces électroniques (circuits intégrés) fabriquées à base de matériaux semi-conducteurs. Les puces électroniques sont aujourd'hui à la base de tout produit microélectronique. Les applications de ces produits sont diverses et touchent la quasi-totalité des activités humaines (voir Tableau 1.1). L'omniprésence des produits microélectroniques dans la vie quotidienne donne un poids considérable à ce secteur dans l'économie à l'échelle mondiale.

L'augmentation continue de l'importance de ce secteur durant les dernières décennies est due à deux facteurs importants caractérisant l'industrie de semi-conducteurs qui sont :

- i) la grande valeur ajoutée et l'amélioration rapide des fonctionnalités proposées : des composants de plus en plus performants (rapidité, consommation d'énergie,...) avec de plus en plus de fonctionnalités grâce à la réduction des dimensions avec les quelles sont réalisés les composants élémentaires d'une puce.
- ii) la réduction permanente des coûts de production et la baisse permanente des prix par fonction : par l'intégration d'un nombre de plus en plus important de

1. Les Laboratoires Bell - Bell Telephone Laboratories ou AT&T Bell Laboratories -, plus connus sous l'appellation de Bell Labs), furent fondés en 1925 et implantés à Murray Hill dans l'État américain du New Jersey. En 2009, ils font partie du centre de recherche et développement d'Alcatel-Lucent. Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Laboratoires_Bell

Secteur	Monde (224 Md €)	Europe (29 Md €)
Informatique/bureautique	41%	30%
Communications	21%	20%
Grand public	18%	9%
Industrie	11%	18%
Automobile	8%	22%
Militaire	1%	1%

Source : ESIA(European Semiconductor Industry Association, <http://www.eeca.eu/esia>.)

TABEAU 1.1 – Parts de marché des semi-conducteurs (année 2010) dans divers secteurs

composants élémentaire sur la même surface.

L'intégration de plus en plus grande, essentiellement due aux avancées technologiques, a suivi un rythme quasi-constant qui a été prédi par la loi empirique de Moore (Gordon Moore (cofondateur d'Intel). Cette loi, qui stipule que le nombre de transistors dans une puce est doublé tous les 18 mois, risque de ne plus être valable car la miniaturisation des transistors possède une limite physique.

Mais le défi d'intégration peut prendre un autre sens connu sous le nom de « more than Moore » qui signifie la nécessité d'intégrer d'autres composants analogiques et/ou de puissance, tel que les capteurs, qui donne d'autres fonctionnalités et qui ne nécessite pas forcément de la miniaturisation.

Avec ces défis d'intégration, la production de masse de circuits intégrés requiert des moyens adaptés et optimisés pour s'aligner sur les prix du marché qui sont continuellement en baisse. En effet, les équipements de production, largement automatisés, et les centres de fabrication présentent des grands investissements, dont le coût est croissant avec les générations de technologies. De plus, le fait que les procédés opèrent aux échelles nanométriques et que les différents flux sont complexes rendent la fabrication des semi-conducteurs un processus tout aussi complexe.

3 La fabrication des puces

La fabrication d'une puce est obtenue par l'association de plusieurs composants électroniques élémentaires interconnectés (transistors, résistances, etc.) qui sont réalisés sur une même plaquette d'un matériau semi-conducteur (en général

du silicium). Le processus de fabrication est schématisé sur la Figure 1.1. Tout d'abord, les plaquettes sont fabriquées en découpant des lingots de silicium monocristallin. En parallèle, les différents masques sont conçus et réalisés pour chacun des produits. Ensuite, les plaquettes rentrent dans une usine appelée de « Front-End » pour subir une succession d'opérations de dépôts (film isolants, films conducteurs, ou films photosensibles), de lithographie, de gravure, de dopage, d'isolation et d'interconnexion. Les flèches indiquent les directions des flux physiques (lots de plaquettes) entre les différents ateliers de l'usine. Ensuite, les plaquettes sont testées et découpées pour obtenir ainsi les circuits individuels. Ces derniers sont assemblés, mis en boîtier et testés dans une usine de « Back-end » pour obtenir les circuits intégrés.

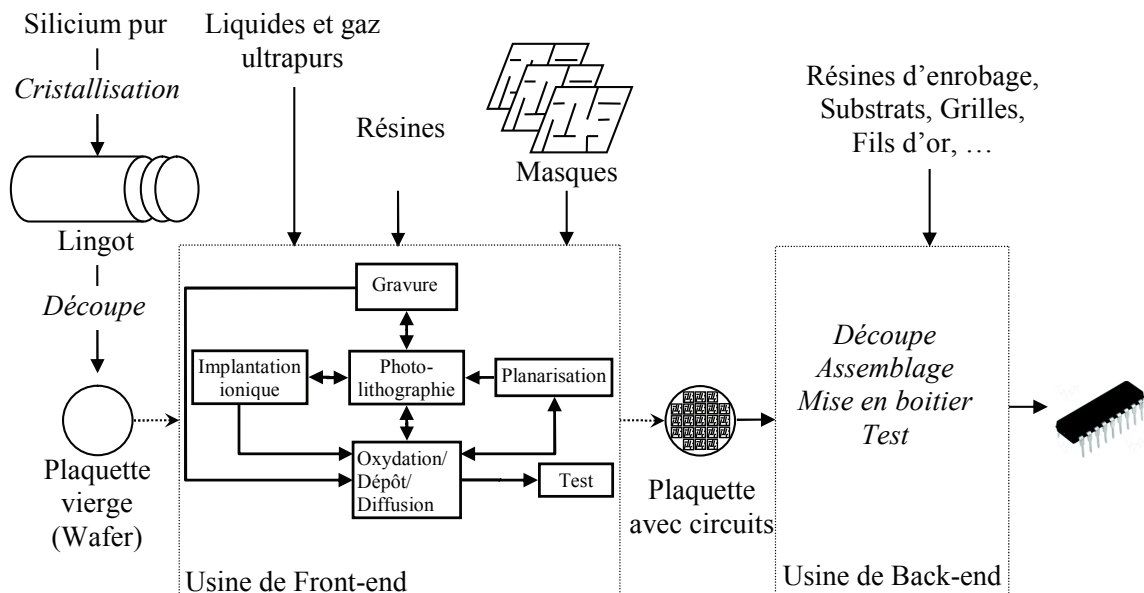


FIGURE 1.1 – Processus de fabrication des circuits intégrés

4 Le processus de fabrication de « Front-end »

4.1 Les principales phases de fabrication

Les plaquettes de silicium vierges subissent des centaines d'opérations de fabrication suivant une gamme spécifique à chaque produit. Chaque opération, pour un produit donné, à une phase donnée, possède sa propre recette qui définit les étapes et les points de fonctionnement de la (des) machine(s) qui l'effectue. Certaines de ces opérations peuvent se répéter plusieurs fois avec des recettes diffé-

rentes avant d'obtenir le produit final. Indépendamment des recettes, les principales phases par lesquelles passe une plaquette dans une usine de front-end sont présentées dans la suite de cette section.

Epitaxie : Cette étape consiste à faire croître du cristal sur du cristal par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche appelée épi-couche.

Oxydation et exposition : L'épi-couche est chauffée afin de développer une couche d'oxyde de silicium qui sert de support des transistors. Un vernis photosensible est ensuite déposé sur l'oxyde.

Photolithographie : c'est une technique permettant d'imprimer une image sur un support photosensible par projection de lumière. Une source lumineuse (ultraviolet) projette l'image du masque pour marquer le vernis photosensible déjà déposé sur la plaquette.

Gravure : Il s'agit de creuser la couche d'oxyde au niveau des zones qui ont été touchées par la photolithographie.

Implantation ionique ou dopage : les zones de l'épi-couche mises à nu par la phase gravure sont chargées électriquement en utilisant un faisceau d'ions de haute intensité. L'entrée et la sortie du transistor dans l'épi-couche de silicium sont ainsi créées.

Dépôt : Cette étape a pour but de créer la grille du transistor. Elle est obtenue par pulvérisation à haute température. C'est une couche fine qui permet de laisser passer le champ magnétique créé par la grille du transistor.

Oxydation : Cette étape permet de créer une couche isolante pour séparer les futures couches de connections.

Connexion des transistors : Cette étape permet de créer les bornes des transistors qui seront reliés aux autres transistors de la même couche. Ceci est obtenu en répétant les opérations de gravure, oxydation et photolithographie pour déposer et isoler les connexions en aluminium.

Planarisation ou polissage : C'est une étape qui prépare la surface de la dernière couche isolante pour déposer une couche de cuivre qui sert pour faire l'interconnexion des transistors de différentes couches.

Inspection : il s'agit d'inspecter la plaquette pour vérifier que les étapes de fabrications sont effectuées convenablement.

Test : une fois toutes les étapes de fabrication terminées, les plaquettes sont testées pour vérifier le fonctionnement de tous les circuits et repérer ceux qui sont défectueux.

4.2 Exemple : processus de fabrication de la technologie CMOS

L'abréviation CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor en anglais, est le nom d'une technologie de fabrication de composants électroniques. Dans ces circuits, un étage de sortie est composé d'un couple de transistors à effet de champ MOSFET² N et P placés de manière symétrique et qui réalisent chacun la même fonction avec un fonctionnement inversé : un transistor est passant alors que l'autre est bloquant. Pour fabriquer un étage de sortie, plus d'une trentaine d'opérations de procédés sont à effectuer en plus des opérations de mesure (Voir figure 1.2). Ces opérations sont effectuées dans différents ateliers spécialisés avec la répartition présentée dans Figure 1.3. Le caractère ré-entrant des flux physiques des produits dans ces ateliers complexifie la tâche de gestion, non seulement, des opérations de fabrication, mais aussi celles des mesures effectuées sur les produits. Ces dernières sont nombreuses et ont leur importance dans la maîtrise du processus de fabrication qui va être détaillée dans la section 5 de ce chapitre.

4.3 Caractéristiques de l'usine de fabrication

La partie centrale d'une usine de semi-conducteurs (usuellement appelé fab) est la « salle blanche ». Elle est caractérisée par des exigences fortes au niveau de la propreté de l'environnement ambiant. En effet, le degré de précision nanométrique des opérations effectuées sur les plaquettes de silicium engendre une forte sensibilité à la contamination par les particules dans l'air. C'est pourquoi les différents paramètres influant de l'environnement ambiant, telle que la température, l'humidité,...et même l'habillement du personnel, sont surveillés et strictement règlementés. Il existe une classification normalisée de degré de propreté (ISO 14644-1) des salles blanches qui est fonction des nombres de particules dans un m³ d'air pour chacune des 6 dimensions seuils allant de 0,1 μm à 5 μm .

2. Acronyme anglais de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - qui se traduit par transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semiconducteur

Le grand nombre et la diversité des étapes de processus de fabrication nécessite une organisation adéquate pour optimiser les flux et maximiser le rendement des ressources de production. Dans cette perspective, une usine de front-end est gé-

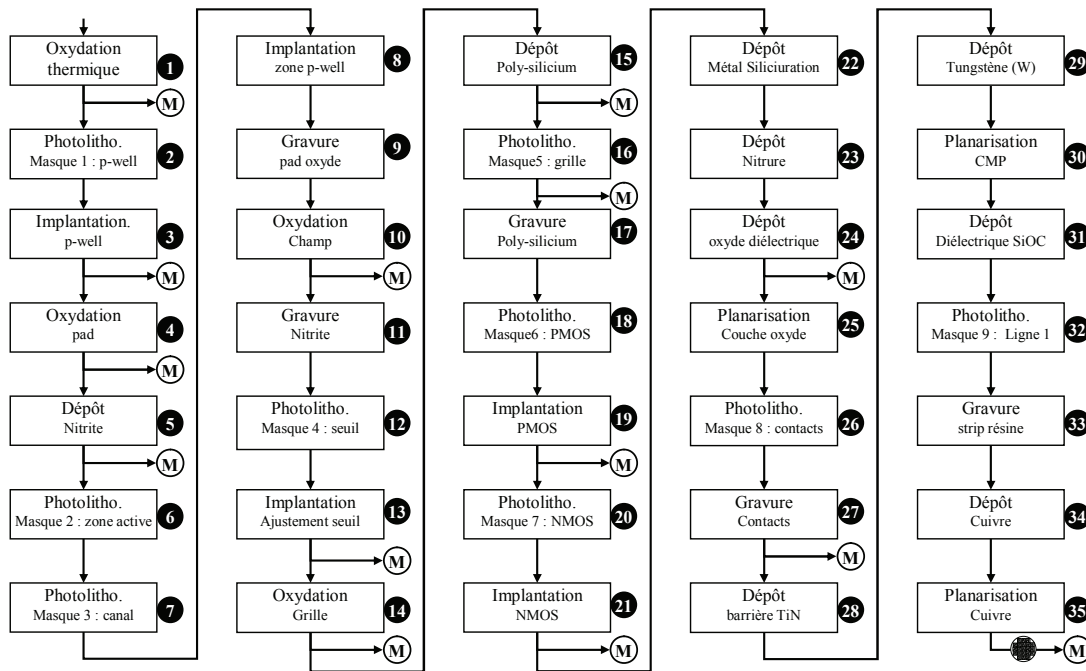


FIGURE 1.2 – Modèle de flux de processus de la technologie CMOS

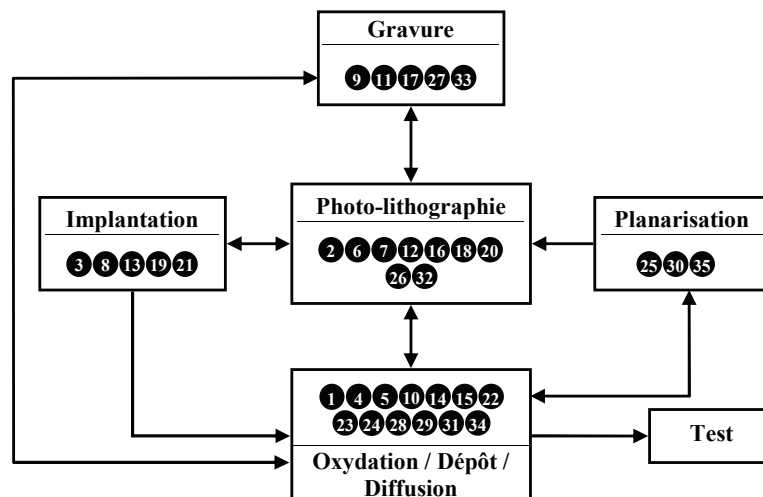


FIGURE 1.3 – Répartitions des opérations de procédés de la technologie CMOS sur les différents ateliers de l'usine « Front-End »

néralement organisée sous forme d'ateliers flexibles où les équipements utilisés pour effectuer une étape donnée sont placés ensemble. L'agencement de ces atelier est choisi de façon à optimiser les transferts des produits d'un équipement à un autre pendant les différents étapes de fabrication.

La fabrication de semi-conducteurs se compose d'une série d'étapes séquentielles répétitives qui sont effectuées sur la surface de la plaquette couche par couche en utilisant des masques différents. Le temps de cycle de fabrication est de l'ordre de 7 à 8 semaines pendant lequel une plaquette subit des centaines d'opérations à fortes valeurs ajoutées. Selon le procédé utilisé, les différentes opérations peuvent être exécutées sur un groupe de plaquettes en même temps ou séparément. Dans tous les cas, les plaquettes sont transportées par lot dans des caissons de protection en plastique appelés « *FOUP* » (Front-Opening Unified Pod) pouvant contenir jusqu'à 25 plaquettes. Le transfert des *FOUPs* entre les différents ateliers est réalisé manuellement ou avec des systèmes automatisés appelés *AMHS* (Automatic Material Handling Systems).

Une autre caractéristique importante de cet atelier concerne les flux de produits qui sont discontinus et ré-entrants (Exemple dans Figure 1.3). En effet, un lot donné peut visiter plusieurs fois le même atelier flexible pour subir le même type d'opération, mais avec des recettes différentes et pas forcément sur le même équipement. Ce qui fait que la modélisation et l'optimisation des flux dans ce type d'atelier présentent des défis majeurs pour les industriels de ce secteur et une source des problématiques de recherche intéressantes.

5 L'importance des mesures

Les mesures et les procédures de contrôle existantes dans les usines de semi-conducteurs modernes proviennent de sources diverses et utilisent de nombreuses techniques. Tout le processus est concerné par ces mesures allant des installations d'infrastructures (bâtiments, installation de distribution des énergies, etc) jusqu'au test fonctionnel final des produits et les mesures fiabilité.

5.1 Sources des mesures

5.1.1 Au niveau de l'infrastructure et des installations techniques

Afin de garantir les meilleures conditions possibles pour la fabrication des plaquettes, qui sont très sensibles à l'environnement ambiant, les bâtiments et les installations techniques ont un grand nombre de paramètres à surveiller :

- Salle blanche : température, humidité, pression, nombre de particules dans l'air, etc.
- Installations des liquides et gaz : température, pression, débit, contamination, etc.
- Sources d'énergie : charge, intensité, consommation, etc.

Ces mesures sont gérées par un centre de contrôle à la manière des usines chimiques. Le but est, entre autres, d'assurer la sécurité des personnes et de l'environnement contre les risques techniques liés aux installations dans un environnement industriel comme la sécurité des machines, la protection contre les explosions et la fiabilité des systèmes de commande relatifs à la sécurité.

5.1.2 Au niveau des équipements

Le processus de fabrication des semi-conducteurs utilise des équipements de fabrication très coûteux et très automatisés utilisant des technologies de pointe. Ils sont souvent équipés d'un grand nombre de capteurs dont une partie est utilisée pour mesurer des paramètres physiques pendant leur fonctionnement. Ces mesures se font de façon échantillonnée ou continue. D'autres paramètres de l'équipement peuvent être mesurés « manuellement » dans le cadre des activités de maintenance (inspections périodiques, révisions,...). Les données récoltées par ces mesures sont stockées, analysées et utilisées pour détecter et diagnostiquer des anomalies de fonctionnement de l'équipement et ainsi déclencher des alarmes et des actions de maintenance. Les techniques et outils utilisés pour exploiter ces données, connus sous le nom « outils de détection et classification des défauts » (FDC : Fault Detection and Classification en anglais), ont pour but de détecter et de localiser le plus précocement possible les modes défaillants du système (ou de l'équipement) surveillé pour éviter un mauvais fonctionnement global. Une telle détection précoce des défauts permet d'éviter les conditions de fonctionnement dangereuses, augmente la disponibilité et la productivité du système et garantit la qualité du produit ou du service. Les deux propriétés les plus importantes de ces outils sont leur aptitude à permettre une détection des défauts à tout coup et leur robustesse qui permet d'éviter les fausses alarmes en présence de perturbations. Ces propriétés sont directement liées à la disponibilité et la fiabilité des données récoltées grâce à ces mesures effectuées sur les équipements.

5.1.3 Au niveau des produits

Pendant le cycle de fabrication

Cette catégorie regroupe les mesures faites sur des plaquettes de silicium en utilisant plusieurs techniques possibles : inspection visuelle, réflectivité, microscopie électronique à balayage, etc. Ces mesures peuvent être classées selon les critères suivants :

- impact sur la plaquette : destructif ou non-destructif
- support : sur plaquettes produit, sur plaquettes d'essai (NPW : Non Productive Wafer), sur plaquettes pilote, etc.
- coût
- complexité : facile, requiert des compétences spéciales, faisable en interne, etc.

Les données obtenues par ces mesures sont gérées directement par le système d'exécution de terrain (MES : Manufacturing Execution System en anglais). Elles servent à la maîtrise statistique des procédés et des analyses de capacités à court et à long termes. Ces dernières sont aussi utilisées dans les rapports destinés aux clients. La prise en charge de ces mesures et de leurs utilisations est souvent assurée, au sein de l'entreprise, par un groupe de spécialistes dédié à la maîtrise du processus.

Hors-ligne de fabrication

– *Test paramétrique*

Ces mesures portent généralement sur les paramètres électriques de base des composants constituant le circuit. Exemples de paramètres mesurés : seuils de tension de transistor, courant de fuite, tension de claquage d'oxyde, résistivité, etc. Ces mesures sont effectuées sur des structures de test spéciales placées sur les lignes de découpe qui séparent les différents circuits de la plaquette.

– *Test final*

Une fois le processus de front-end achevé, les circuits sur les plaquettes sont soumis à une variété de tests électriques pour déterminer si elles fonctionnent correctement. La proportion des circuits conformes sert de base pour le calcul du rendement.

– *Caractérisation physique et tests de fiabilité*

La caractérisation physique est généralement effectuée en utilisant des techniques destructives. Les mesures sont utilisées pour l'ingénierie inverse de produits à faible rendement ou pour tester de nouvelles options technologiques. Les tests de fiabilité sont utilisés pour évaluer la durée de vie des composants

sous diverses conditions (humidité, température, corrosion, etc.)

Les informations apportées par ces mesures sont utilisées par des ingénieurs dont les activités sont centrées sur les problématiques liées à l'intégration, à la fiabilité des produits et au rendement du processus. Les tests finaux sont également des tests d'inspection et d'acceptance. Ils constituent la dernière barrière permettant de capter les produits défectueux avant que ceux-ci ne soient envoyés chez le client.

5.2 Utilisation de mesures effectuées sur les plaquettes

Les différentes mesures prélevées ont de nombreuses utilisations à court, moyen et long termes (voir Figure 1.4). Les principales raisons pour lesquelles des mesures sont effectuées sur les plaquettes sont les suivantes :

- **Diminuer la durée de la phase de montée en volume**
Généralement, plus de données recueillies pendant la phase de développement et d'industrialisation signifient un apprentissage rapide des nouvelles technologies fabriquées et une meilleure montée en rendement du processus ;
- **Surveiller la technologie et la qualité des produits**
Même sur des technologies qualifiées comme « mature » ou « industrielle », les ingénieurs peuvent avoir besoin d'un minimum de données pour assurer la stabilité de la technologie et l'améliorer
- **Surveiller/Assurer la qualité des produits**
Comme il y a des centaines d'opérations de processus à faire avant d'obtenir une plaquette terminée, certains paramètres critiques doivent être mesurés régulièrement. Plus le défaut est détecté tôt, moins son impact sera important en termes de coûts et des pertes qualité ;
- **Réguler/ajuster le processus**
Les mesures sont également utilisées pour l'alimentation des dispositifs de régulation automatique qui ajustent les paramètres de recette des équipements (en amont ou en aval) en fonction des résultats des mesures ;
- **Corriger/ré-exécuter une étape de processus**
Certaines étapes du processus peuvent être ré-exécutées afin de corriger une insuffisance ou un défaut récupérable sur une opération. Des mesures sont nécessaires pour décider, à une étape donnée, si un produit doit être retouché ou s'il peut continuer sa route ;
- **Contrôler le processus**
Des mesures sont utilisées par les outils de MSP tels que les cartes de contrôle pour surveiller le comportement de processus et s'assurer qu'aucun événement n'est venu le dérégler ;

– **Qualifier les équipements**

Lorsque des nouvelles technologies (familles de produits) sont introduites dans le processus de fabrication ou lorsque des nouveaux équipements sont installés, des mesures spécifiques peuvent être demandées pour les qualifier et calculer les indices de capabilité de ces équipements ;

– **Diagnostiquer et enquêter sur des événements spécifiques**

Quand un événement perturbateur non commun est détecté, on peut avoir temporairement besoin d’acquérir plus de données sur une partie très précise du processus. Ces données servent pour rechercher l’origine et les causes de cet événement.

L’ensemble des usages autour des mesures effectuées sur les plaquettes montre leurs importance dans la maîtrise de processus de fabrication. Cependant, concevoir, planifier, prélever et exploiter ces mesures sont des tâches complexes. En effet, l’impact de ces mesures sur le temps de cycle et le coût élevé des équipements de mesure pousse à la recherche d’une vision globale qui permet de tenir compte de tous ces usages.

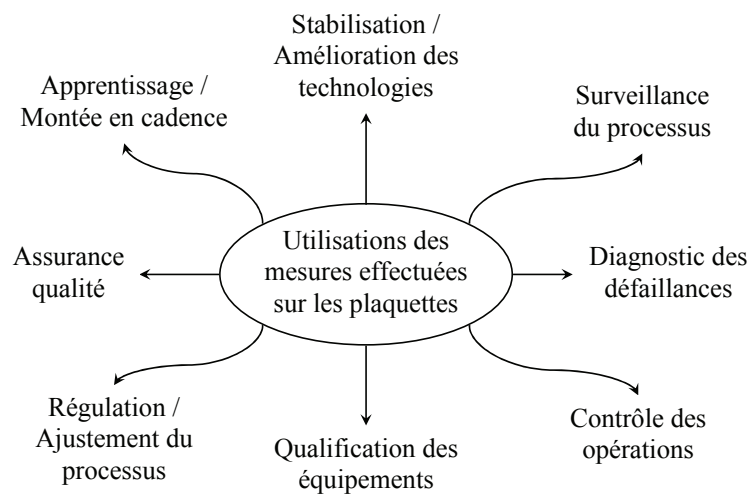


FIGURE 1.4 – Différents usages des mesures effectuées sur les plaquettes

6 La problématique

La problématique, que nous décrivons ici, est issue du domaine de l’industrie de semi-conducteur vu le cadre du projet européen dans lequel ces travaux de recherche ont été menés. Néanmoins, la complexité des processus de fabrication et la diversité de problématiques traitées dans ce secteur pourrai aussi s’appliquer

aux autres secteurs industriels.

Dans le but de maîtriser la qualité des produits et les processus de fabrication, divers contrôles sont appliqués durant les différentes étapes de fabrication. Vu le grand nombre de ces étapes, les contrôles génèrent un grand volume de données. En effet, à chaque produit fabriqué correspondent quelques centaines d'opérations de contrôle effectuées sur le produit lui-même ou sur les équipements qui exécutent les différentes étapes de fabrication. Alors que les données de contrôle récoltées sur les équipements sont utilisées pour la détection des défaillances ou la dégradation des équipements, les données issues des produits sont utilisées pour la détection des dérives et l'ajustement de processus. Ces dernières peuvent être obtenues par des mesures de l'aspect structurel (dimensions, état de surface,...) ou de l'aspect fonctionnel (résistivité, puissance, fréquence,...). En plus de leur utilisation en « temps réel » pour maîtriser la qualité du produit et du processus, ces données de contrôle sont stockées à long terme et réutilisées dans une boucle d'amélioration continue de processus.

Les méthodes et les outils de contrôle utilisés pour chaque type de données sont divers et variés. Ils sont prescrits dans un plan de surveillance qui spécifie pour chacun des critères pris en compte (du produit ou de l'équipement) la stratégie de contrôle à appliquer et les règles de décision à utiliser en fonction des données de contrôle obtenues (voir Figure 1.5). L'exécution de la stratégie de contrôle et des actions décidées constitue une boucle de contrôle de processus. Toutefois, et malgré l'efficacité « locale » de ces stratégies, leur efficacité globale n'est pas toujours garantie à cause du manque d'une approche efficace de planification intégrée garantissant leur cohabitation et leur coordination.

Le processus d'exécution de la stratégie de contrôle est un processus séquentiel qui est fortement interactif avec d'autres processus opérationnels de l'entreprise et qui est souvent confronté à des aléas de sources diverses : décisions d'opérateurs humains, files d'attente, partage des ressources, etc. Par exemple, le processus de mesure des paramètres de contrôle, schématisé dans la Figure 1.6, illustre bien les sources de ses interactions et aléas qui ont leurs impacts sur la disponibilité et la rapidité d'acquisition des données de contrôle. L'obtention de ces dernières constitue une étape primordiale dans le processus de contrôle.

Le problème est qu'en l'absence d'une approche de planification dynamique et globale de contrôle de différentes étapes du processus, rien ne garantit la maîtrise absolue de la qualité du produit final, et même s'il existe une étape de test final à 100% des produits garantissant qu'aucun produit défectueux n'est livré au client, le risque de se trouver devant une grande quantité de produits non conformes

reste à craindre pour ne pas augmenter les coûts et les délais de fabrication. La planification est dynamique dans le sens qu'elle s'adapte aux différentes phases d'industrialisation (Prototype, présérie, montée en volume, volume maximale), aux différents changements dans le processus de contrôle (nouveaux contrôles,

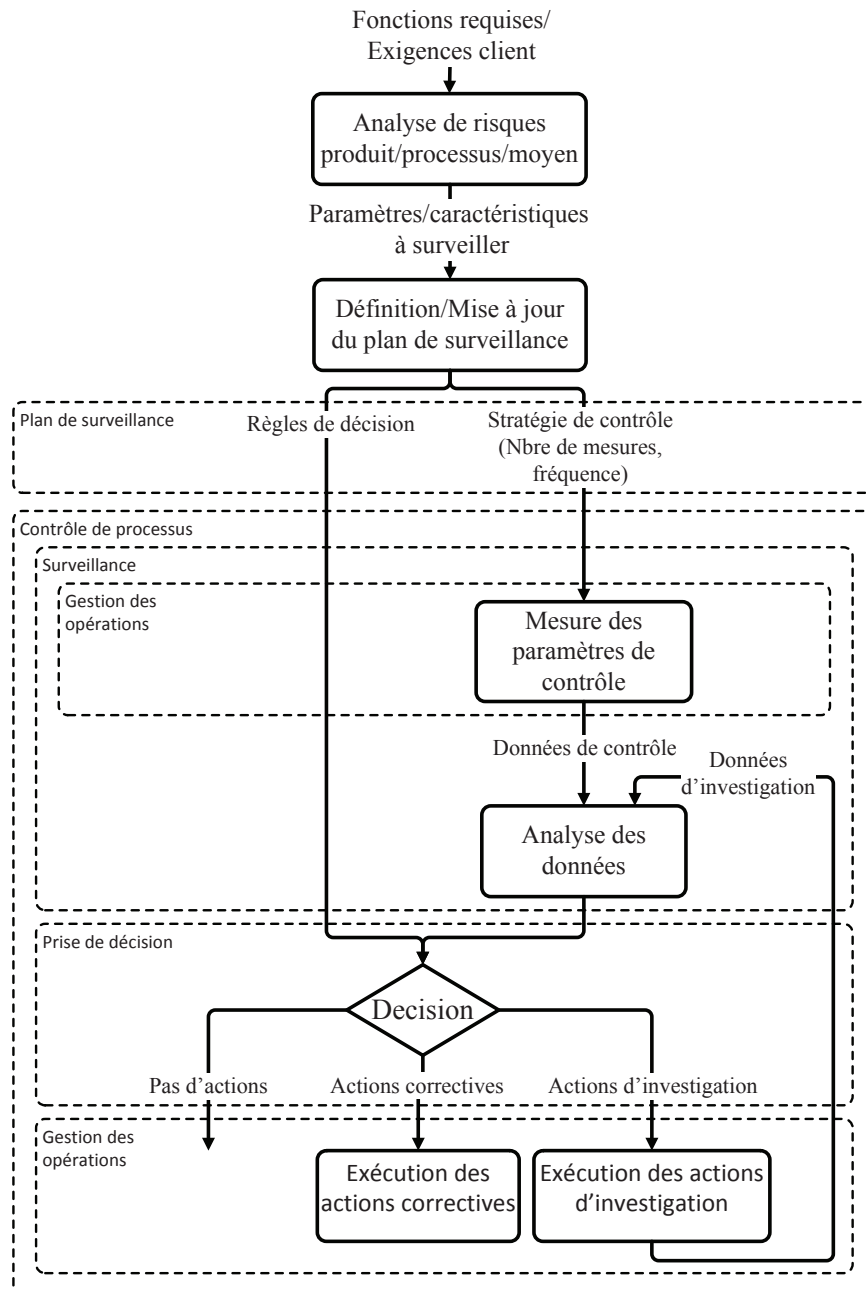


FIGURE 1.5 – Plan de surveillance et contrôle de processus

nouvelles technologies,...) ou dans le processus de production (nouveaux produits, nouvelles technologies,...)

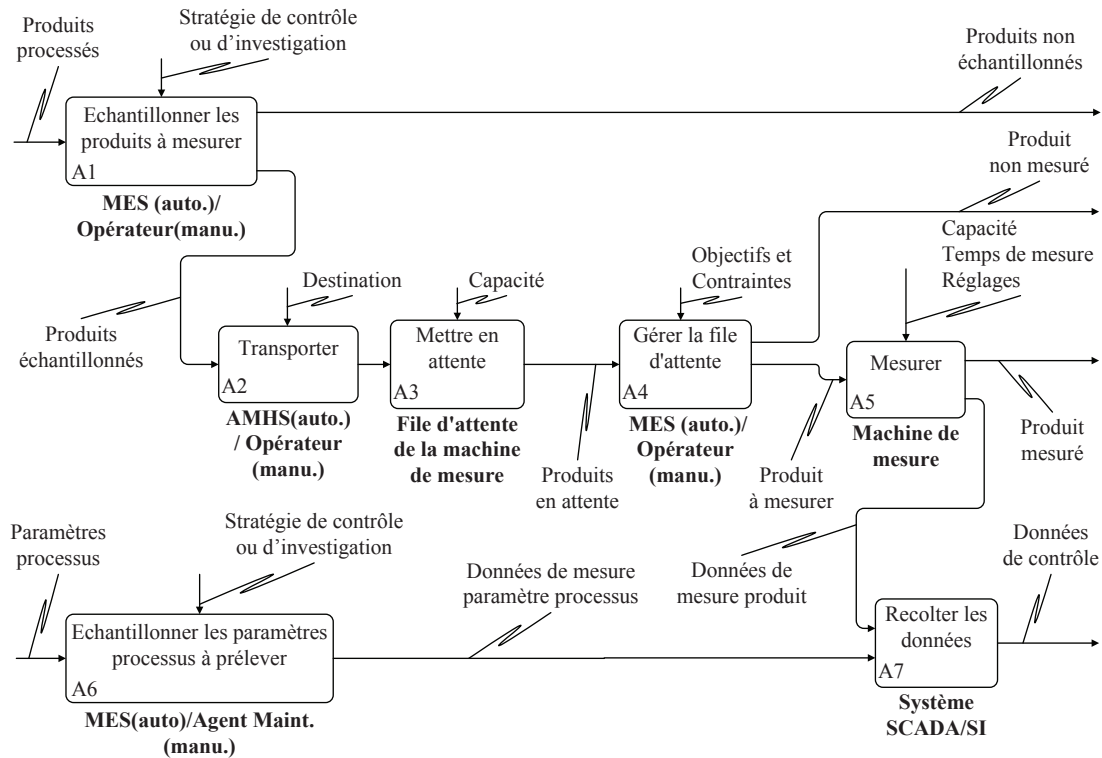


FIGURE 1.6 – Le processus de mesure des paramètres de contrôle

Les deux principales questions dressées dans ces travaux de thèse et auxquelles quelques éléments de réponse vont être proposés, sont les suivantes :

1. Quelle (s) approche (s) et quel (s)s critère (s) utiliser pour faire une planification globale des activités de contrôle de la qualité des produits et du processus ?
2. Comment rendre dynamique la planification des activités de contrôle de façon à tenir compte des contraintes des ressources et des évolutions opérationnelles en temps réel ?

7 Conclusion du chapitre 1

L'industrie du semi-conducteur est caractérisée par un processus de fabrication complexe dont le contrôle repose sur une très grande quantité d'information issues des mesures diverses. Ces mesures qui sont effectuées sur des outils et des produits très sensibles aux variations des conditions opératoires, nécessitent une

stratégie adéquate de planification en se qui concerne leur récolte et leur exploitation dans le contrôle de processus. Une telle stratégie ne peut pas être déconnectée des autres stratégies de planification et de gestion des ressources.

Chapitre 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Sommaire

1	Introduction	25
2	Le plan de surveillance	27
2.1	Définition	27
2.2	Rôle	29
2.3	Nécessité d'un plan de surveillance dynamique	29
2.4	La conception d'un plan de surveillance	31
3	La gestion des risques	32
4	La Maîtrise Statistique des Procédés (MSP)	34
4.1	Définition	34
4.2	La variabilité et la capacité	36
4.3	Les cartes de contrôle	40
5	L'allocation et la planification des inspections	45
6	Conclusion du chapitre 2	51

1 Introduction

Comme nous l'avons signalé lors du premier chapitre, la problématique traitée dans cette thèse concerne la planification de la surveillance d'un processus dans la perspective d'un contrôle efficient tenant en compte les contraintes des ressources de maîtrise et ses interactions avec les autres processus opérationnels. Pour cela, la revue de littérature présentée dans ce chapitre est centrée essentiellement sur les principales méthodes et outils de contrôle de processus de manière générale et plus particulièrement ceux qui sont liés à la maîtrise des risques opérationnels qui peuvent impacter l'efficacité de processus en termes de qualité, coût, délais et volume.

Le contrôle de processus est un terme utilisé pour désigner l'ensemble de méthodes et de matériels servant à piloter et surveiller le processus de fabrication de produits. Les activités de contrôle de processus agissent sur les entrées contrôlables du processus afin qu'il délivre des produits conformes aux caractéristiques requises avec le niveau de performance souhaité (voir Figure 2.1). Ces activités peuvent toucher tout ou partie des fonctions techniques, organisationnelles et managériales du processus. Un processus comporte des intrants et des extrants, des variables contrôlables (en haut du graphique) et certaines incontrôlables (mentionnées en bas du graphique). Des variables observables du processus et du produit sont observées par des moyens de mesure. Des actions de maîtrise sont éventuellement prises. Elles sont symbolisées par la flèche « actions de contrôles ». Elles portent à la fois sur le processus de fabrication (réglages, maintenances, modification des fréquences d'observation,...) et sur le produit (ré-exécution d'opérations, retouche, mise au rebut,...)

Le mot contrôle a suscité quelques débats dans les communautés de l'automatique et de la qualité sur la légitimité de son utilisation pour qualifier les outils statistiques utilisés par la qualité comme les cartes de contrôle. Certains chercheurs ([Holmes et Mergen, 2011] par exemple) pensent que malgré l'existence du mot « control », la Maîtrise Statistique de Procédés (Statistical Process Control en anglais), ne doit pas être considérée comme un système de contrôle, mais plutôt comme un système de surveillance qui signale les écarts du processus par rapport au comportement attendu. Ce mot est utilisé lorsque le système de contrôle permet de générer automatiquement des actions correctrices (ou de pilotage) ce qui est le cas des techniques de contrôle automatique des procédés (APC : Automatic Process Control en anglais). En effet, si les cartes de contrôle, par exemple, permettent de détecter efficacement (de façon fiable et rapide) les variations anormales du processus, ils ne précisent pas sur quels paramètres du processus il faut

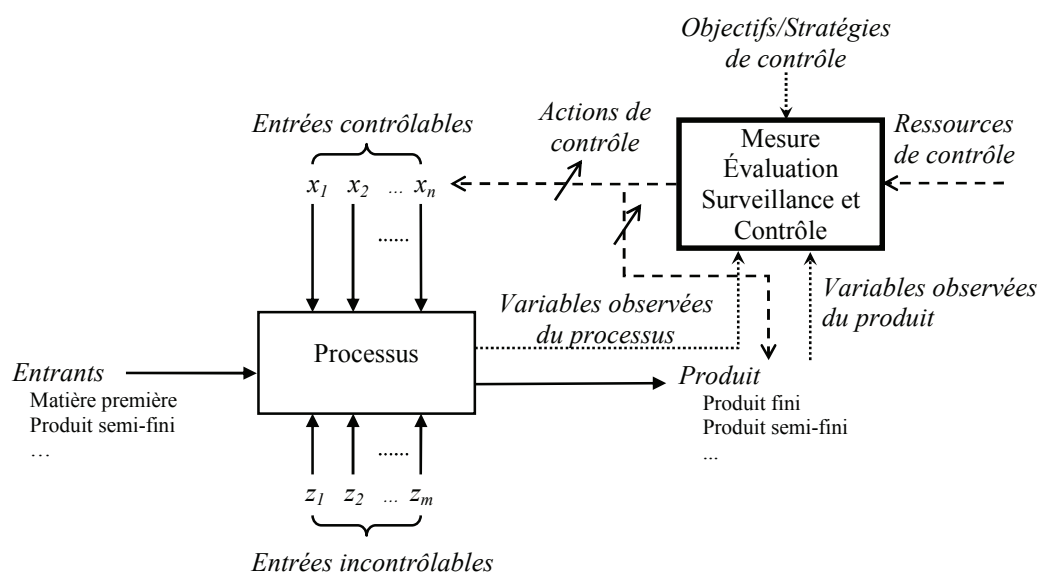


FIGURE 2.1 – Le contrôle de processus

agir et avec quelle amplitude. En plus, la détection ne constitue qu'une des étapes du processus de contrôle. La détection est suivie des étapes de validation et de recherche de causes avant l'étape de mise en place de l'action corrective ce qui présente des coûts qui s'ajoutent aux coûts des produits défectueux et aux coûts d'arrêt engendré.

Mise à part ce différend terminologique, qui, à notre point de vue, n'a pas une très grande importance puisque l'objectif pour les deux approches est de maîtriser la variabilité du processus, la vraie question qui se pose est, de manière générale, comment faire le choix d'une ou plusieurs de ces techniques et comment les faire cohabiter ?

Concernant le choix entre les outils « Statistical » ou « Automatic », Vining [Vining, 2010] pense que le vrai facteur déterminant est la fréquence à laquelle le processus est sujet à perturbations, c'est-à-dire des événements précurseurs des variations anormales. Si des perturbations se produisent rarement, alors les techniques SPC devraient bien fonctionner si elles sont associées à un service d'ingénierie « process control » qui permet de faire les changements nécessaires pour corriger le processus. Par contre, si le processus est soumis à des perturbations très fréquentes, alors des outils APC semblent plus adéquats. Vining propose de faire le choix en fonction de taux prévu de perturbations dans le processus et des coûts des ajustements de processus.

Il existe plusieurs techniques et outils qui sont utilisés pour concevoir et mettre en place un système de contrôle tel que la Maîtrise Statistique des Procédés (MSP), les boucles de régulation Run-to-Run (R2R), les techniques de détection et de classification des défauts (FDC : Fault Detection and Classification), etc. La cohérence organisationnelle et fonctionnelle de ces solutions n'est pas toujours évidente. En outre, ces solutions doivent être hautement reconfigurables afin de toujours s'adapter aux évolutions permanentes des exigences et des capacités d'une usine de nos jours. Dans le domaine du semi-conducteur, la norme SEMI E133 [SEMI, 2007] présente les règles à suivre pour définir des interfaces pour les systèmes de contrôle de processus qui leur permettent d'interagir de manière efficace entre eux et avec les autres systèmes interdépendants de l'usine [Moyne et al., 2007].

L'intégration de différentes disciplines liées au contrôle de processus a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Certains se sont focalisés sur l'aspect mathématique de l'intégration d'outils issus de MSP et/ou de l'APC et la Maintenance [Jiang, 2004, Jiang et Tsui, 2000, Tsung et Shi, 1999, Linderman et al., 2005]. D'autres ont visé les aspects organisationnels et de gestion pour intégrer plusieurs techniques comme [Schippers, 2001]. Schippers propose un modèle permettant d'avoir une cartographie des différents outils de contrôle de processus qui sont en place en précisant leurs fonctions (dans quel but sont ils utilisés ?) et leurs emplacements (à quel niveau le contrôle est-il effectué ?). À part son rôle descriptif et explicatif, le modèle peut être utilisé pour décrire les étapes à suivre pour atteindre la « cartographie optimale » qui peut être dynamique en fonction des caractéristiques du processus à contrôler, des objectifs et l'état des connaissances métier.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les principaux outils et méthodes qui sont liés à la discipline de contrôle des processus. Cette panoplie couvre plusieurs aspects indispensables pour concevoir et mettre en route un système de contrôle de processus.

2 Le plan de surveillance

2.1 Définition

Un plan de surveillance de processus est un document qui contient la liste des dispositifs en place pour surveiller les paramètres de fonctionnement du processus et les caractéristiques du produit. Les principaux éléments qui figurent dans un plan de surveillance (Figure 2.2) sont :

En tête

- ❶ Numéro de référence et Catégorie du plan de surveillance
- ❷ Révisions et mises à jours
- ❸ Informations sur l'objet surveillé
- ❹ Groupe de travail et approbation interne
- ❺ Approbations client (si nécessaire)

Une ligne pour chacune des caractéristiques surveillées contenant :

- ❻ Numéro de référence et description de pièce/opération
- ❼ Nom du machine/outil de fabrication utilisé
- ❽ Toute propriété du processus ou du produit sur laquelle des données variables peuvent être recueilli
- ❾ Spécifications et méthode utilisée pour contrôler la caractéristique surveillé
- ❿ Les actions correctives nécessaires pour éviter de produire des produits non conformes ou pour faire face à des hors contrôle.

La mise en place et mise à jour d'un plan de surveillance est l'une des exigences particulières au secteur automobile des normes ISO-9001 (ISO/TS 16949). Ces exigences concernent le système de management de la qualité qui doit établir et mettre en œuvre une planification avancée de la qualité du produit (en anglais Advanced Product Quality Planning : APQP). Dans le secteur automobile, trois fabricants américains (Chrysler, Ford et General Motors) ont édité le manuel « Advanced Product Quality Planning and Control Plan » qui donne des directives pour la mise en place d'un plan de surveillance [Chrysler et al., 1995].

Catégorie du plan de surveillance <input type="checkbox"/> Prototype <input type="checkbox"/> Présérie <input type="checkbox"/> Production			Plan de surveillance							Page .../...	
Numéro du plan			Niveau de changement de conception/révision (si néc.)				Date création		Date de révision		
Numéro de pièce/produit			Personne responsable				Approbation service ingénierie du client/Date (si néc.)				
Désignation/Description			Membres de l'équipe				Approbation service qualité du client/Date (si néc.)				
Fournisseur/Usine		Code/ID du fournisseur	Approbation Fournisseur/usine/Date (si néc.)				Autre approbation/Date (si néc.)				
Numéro de pièce/ processus	Nom de processus/ Description d'opération	Machine/outil de fabrication	Caractéristiques			Méthodes				Plan d'action	
			N°	Produit	Processus	Spécification/ Tolérance Produit/ Processus	Technique d'évaluation /de mesure	Taille d'échantillon	Fréquence		Méthode de contrôle
❻		❼		❽			❾			❿	

FIGURE 2.2 – Le document Plan de surveillance

2.2 Rôle

L'objectif d'un plan de surveillance est de garantir que la conformité du processus est maintenue tout au long de la production. Il spécifie les moyens de contrôle et les fréquences associées à chaque contrôle. Les mesures effectuées sur les caractéristiques produites ou sur les paramètres du processus permettent d'évaluer si les caractéristiques produites sont conformes et orientent les décisions à prendre en direct sur le processus.

Les avantages de l'élaboration et la mise en œuvre de plans de surveillance sont les suivantes :

- Améliorer la qualité des produits lors de la conception, la fabrication et l'assemblage,
- Aider à l'identification des caractéristiques des processus et de leurs sources de variation,
- Aider à concentrer les ressources sur les processus et les produits liés à des caractéristiques qui sont importantes pour le client, ce qui augmente par conséquent la satisfaction du client,
- Fournir un moyen approprié pour communiquer sur les changements dans les caractéristiques du produit et/ou du processus, les méthodes de contrôle et de mesure.

2.3 Nécessité d'un plan de surveillance dynamique

Dans la norme ISO/TS 16949, il est spécifié que le plan de surveillance doit s'adapter à trois phases distinctes d'industrialisation d'un produit : prototype, production de pré-série et production en série. La mise à jour du plan de surveillance est aussi exigée dans les cas suivants : changement dans le produit ou le processus, augmentation de la variabilité ou perte de capacité du processus ou modification des stratégies et/ou moyens d'inspection.

Cette différenciation entre les trois phases d'industrialisation (Figure 2.3) intègre déjà une dynamique liée à l'apprentissage et aux risques. En phase de prototype, le plan de surveillance a pour objectif de spécifier les contrôles à effectuer pour vérifier que ce qui a été conçu est réalisable conformément aux exigences fonctionnelles du produit. Lorsqu'il est exécuté, il permet de détecter les problèmes majeurs de conception. Le plan de surveillance de pré-série doit spécifier les contrôles à effectuer pour évaluer le degré d'aptitude du processus, à court terme, à réaliser le produit conformément aux exigences. Les données de contrôle prélevées dans cette phase peuvent aussi servir à évaluer l'aptitude à long terme

du processus pour des produits similaires qui sont en phase de production en série. Cette phase permet aussi d'améliorer la connaissance des risques grâce à un retour d'expérience permettant de mieux évaluer les risques déjà recensés et en identifier éventuellement de nouveaux. Après la phase de pré-série, le plan de surveillance doit être adapté à la production en grand volume. Il doit contenir les contrôles nécessaires pour maîtriser la performance du processus, c'est à dire garantir, voire améliorer, son aptitude à long terme. En effet, dans cette phase les contrôles planifiés doivent être au juste nécessaire car ils consomment de la ressource de contrôle qui est limitée.

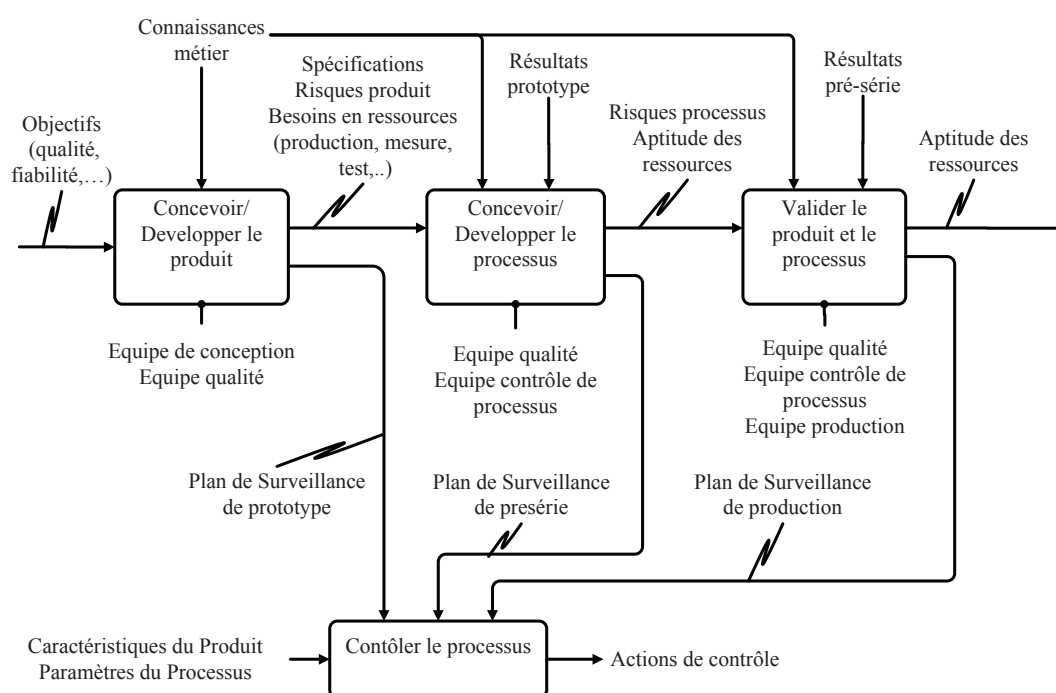


FIGURE 2.3 – Les trois phases d'un plan de surveillance

Le besoin en ressources de contrôle (de mesure, d'analyse/décision, d'actions), pour un produit donné, n'est pas de la même ampleur dans les trois phases de son industrialisation. Une première question qui se pose ici concerne le dimensionnement des ressources de contrôle : sur quelle base dimensionner les ressources de contrôle de processus de façon à tenir compte des évolutions du besoin en contrôle en présence d'un nombre variable des produits qui sont dans différentes phases d'industrialisation ?

Dans l'industrie des semi-conducteurs, une première réponse à cette question consiste, généralement, à évaluer le besoin en termes d'équipements de mesure au moment de développement et de l'industrialisation d'une technologie. Soit

l'équipement nécessaire existe et on va s'arranger pour « libérer » de la capacité en échantillonnant d'avantage les technologies matures, soit il faut faire appel à un nouveau type d'équipement de mesure et on considère un investissement. Dans ce cas, on se base sur la criticité des étapes à mettre au point pour définir le premier plan de surveillance « cible » .

Dans un environnement complexe comme la fabrication de semi-conducteurs, Bassetto et Siadat [Bassetto et Siadat, 2009] défendent l'idée d'une révision systématique des plans de surveillance à chaque fois qu'un événement spécifique se produit. Cette révision se base sur une méthodologie originale d'analyse des risques liants le processus, l'outil de fabrication et le produit et intégrant le retour d'expérience et l'expertise humain.

2.4 La conception d'un plan de surveillance

La conception d'un plan de surveillance nécessite la réponse à chacune des questions suivantes :

Où surveiller ? à quel niveau du processus

Quoi surveiller ? quel paramètre, quelle caractéristique mesurer

Qui surveille ? la ressource à utiliser pour mesurer

Quand mesurer ? date fixe, fréquence, conditionnel/systématique

Comment contrôler ? technique et règles de décision associées

La conception des plans de surveillance est souvent une démarche incrémentale. Par exemple, dans une démarche classique basée sur la méthode AMDEC¹ [Department of defense, 1980] (Voir Annexe B), on commence forcément par l'évaluation, en terme de risques, d'un plan de surveillance initial (criticité initiale de chaque mode de défaillance). Ensuite, selon le seuil de risque prédéfini, le plan de surveillance initial est adapté de façon à avoir tous les risques en dessous du seuil. L'AMDEC cherche d'abord à éliminer ou réduire, le plus possible, les risques par des actions directes sur les causes, des modifications du processus, voire la re-conception du produit ou du processus. Si des telles actions sont impossibles, insuffisantes ou trop coûteuses, le plan de surveillance final doit répondre aux questions précédentes pour maîtriser les risques (réduire leur criticité en dessous du seuil acceptable).

[Ozouf, 2009, Ozouf et Pillet, 2007, Pillet et al., 2007] proposent des méthodes pour la conception du plan de surveillance minimal (juste nécessaire) qui permet d'avoir un niveau de risque (Criticité (C), appelé aussi en anglais Risk Priority

1. Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité

Number (RPN)) partout inférieur à un seuil prédéfini. L'approche consiste, en premier lieu, à pondérer la note de gravité de chaque mode défaillance par son impact sur les fonctions du produit. Ensuite, et en fonction du niveau de détection nécessaire, pour garantir le niveau de risque souhaité, la position de contrôle (où) et le mode de détection (comment) sont choisis. Ces méthodes concernent les plans de surveillance des phases de conception et d'industrialisation d'un produit et se basent sur des méthodes classiques d'analyse de risques telles que l'AMDEC et l'AdD².

3 La gestion des risques

Le risque est défini par la norme ISO comme étant « l'effet de l'incertitude sur les objectifs ». C'est l'effet sur les objectifs, s'il s'avère négatif, qui amènent la nécessité de gérer les risques. Une définition complémentaire du risque naturel ou technologique est donnée par l'institut des risques majeurs³ : « la combinaison d'enjeux exposés à un aléa. »

La gestion des risques est un processus qui peut être parfois complexe. Il faut d'abord analyser (identifier, évaluer et hiérarchiser) les risques avant de définir la manière de les gérer. Plusieurs stratégies sont possibles :

- Éviter les risques par la prévention ;
- Réduire les risques en réduisant un ou plusieurs des leurs paramètres d'évaluation ;
- Accepter les risques ;
- Transférer le risque partiellement ou totalement à une autre partie (par exemple, en souscrivant à une assurance ou une garantie, etc.)
- Répartir les risques (par exemple, dans des cas de partenariats, contrats de sous-traitance, etc.)

La question du choix de la (ou des) meilleure(s) stratégie(s) à appliquer est au centre de la gestion des risques. Éviter le risque par la prévention est de loin la meilleure mesure, car elle élimine la cause du risque. Ainsi, par exemple, le risque d'intoxication chimique est évité si des substances non toxiques sont utilisées. Le coût d'évitement du risque est souvent très faible comparé au coût des conséquences si le risque se réalise. C'est la stratégie la plus intuitive, très souvent utilisée dans la vie quotidienne. Par exemple, les quelques minutes supplémentaires pour vérifier le trafic routier avant de partir à l'aéroport et en choisissant

2. Arbre de Défaillance

3. www.irma-grenoble.com

un itinéraire alternatif approprié, permettent d'éviter le coût de rater le vol et ses conséquences. Cependant, l'évitement n'est pas toujours possible ou approprié pour chaque risque. Pour cela, diverses mesures de réduction des risques sont possibles : réduire la probabilité d'occurrence, réduire les conséquences par des dispositifs de protection ou réduire la propagation en améliorant la détectabilité.

Pour concevoir et/ou choisir les outils de contrôle de processus à utiliser et ainsi construire le plan de surveillance, l'analyse des risques est une étape incontournable pour pouvoir identifier les paramètres du processus et du produit qui sont à contrôler.

Il existe deux grandes familles d'analyse de risques selon la nature de données de sortie de l'analyse qui peuvent être qualitatives ou quantitatives. Dans [Tixier et al., 2002], les auteurs ont recensé 62 outils d'analyse de risques dont la majorité est utilisée dans le domaine industriel. La méthode d'évaluation du risque diffère selon l'outil d'analyse utilisé et le domaine où elle est appliquée : finances, industrie, santé,... Elle peut aller d'une simple qualification qualitative textuelle (faible, moyen, désastreux, etc), à des grilles de cotation quantitative et jusqu'à l'utilisation d'outils mathématiques avancés d'analyse de fiabilité. [Klinke et Renn, 2002] propose un ensemble de critères de classification et d'évaluation des risques. Ils servent de base pour définir une stratégie de prise de décision pour gérer chacune des classes de risques.

Dans le domaine des finances, le risque concerne le retour sur investissement dans la gestion de portefeuille financier. Beaucoup de recherches dans ce domaine ont été concentrées sur la meilleure métrique pour mesurer le risque en termes de pertes financières d'un portefeuille ([Markowitz, 1952, Szegö, 2005]). Le but est toujours d'aider à la décision quant aux choix des investissements à faire.

Dans le domaine industriel, le risque peut être analysé de deux points de vue différents qui ont leur importance selon le secteur industriel et la nature du processus de fabrication. Le premier point de vue est relatif aux aspects sécurité des personnes et impacts environnementaux. Le deuxième point de vue concerne la qualité de produit et de processus. Ce sont les aléas qui peuvent impacter les objectifs de performance de processus et la satisfaction du client.

Les risques aux quels nous faisons référence dans cette thèse, se situent exclusivement dans un contexte industriel avec un point de vue qualité de produit et de processus. Le risque représente essentiellement les défaillances potentielles qui peuvent impacter le produit ou le processus avec les trois dimensions qualité, coût et délais. [Lewis, 2003] qualifie ces risques comme étant des risques « opé-

rationnels » car ils sont liés à l'exécution des opérations de production. Une opération défaillante a des conséquences négatives internes (perte de performances) et externes (impacts sur le client). Lewis présente un modèle générique, basé sur cette définition, qu'il a testé sur des études de cas.

L'une des méthodes les plus utilisées dans l'analyse des risques dans le monde industriel est l'AMDEC. C'est une méthode inductive (cause -> conséquences) qui examine pour chaque élément les façons (ou modes) avec lesquelles il cesse d'assurer ses fonctions requises (défaillance). Les différents modes de défaillance du système sont analysés pour trouver leurs causes et leurs effets sur les objectifs du système. La hiérarchisation de ces modes de défaillance est effectuée en se basant sur l'évaluation de leurs trois attributs : l'occurrence, la sévérité et la non-détectabilité. Le produit de ces attributs, qui constitue une mesure du risque associée au mode de défaillance, est appelé Criticité ou indice du risque. Le mode de défaillance est autant plus critique que la valeur de sa criticité est élevée. Un plan d'action est toujours associé à une étude AMDEC pour gérer ces risques. Ces actions ont pour objectifs d'éviter ou atténuer seulement les risques considérés comme critiques. Les autres risques sont considérés comme acceptables.

Un des inconvénients majeurs des AMDEC est que, dans certains secteurs, elles peuvent devenir rapidement obsolètes et nécessitent un suivi et une mise à jour réguliers. Dans les travaux de [Mili et al., 2009], les auteurs montrent qu'il est possible d'utiliser la méthode AMDEC dans un environnement plus dynamique en fonction des événements opérationnels. Ainsi, la méthode AMDEC est utilisée comme un outil opérationnel pour améliorer la productivité. Ils proposent une méthode de maintenance basée sur le risque, qui repose sur la mise à jour régulière et automatique des analyses de risques des équipements, y compris l'histoire de défaillance de l'équipement.

4 La Maîtrise Statistique des Procédés (MSP)

Une partie des outils, utilisés pour surveiller un processus et détecter ses anomalies, se base sur des statistiques d'observations des variables observables relatifs au processus lui-même ou à ses extrants. C'est cette partie, couramment employée, que nous allons détailler à présent.

4.1 Définition

La Maîtrise Statistique des Procédés (SPC pour Statistical Process Control en anglais), est définie par la norme AFNOR X06030 [AFNOR, 1992] comme suit :

*La MSP est un ensemble d'actions pour évaluer, régler et maintenir un procédé de production en état de fabriquer tous ses produits conformes aux **spécifications** retenues et surtout avec des **caractéristiques stables** dans le temps. La MSP est un des **éléments dynamiques** du système qualité, et à ce titre, concourt à l'amélioration permanente de la production,...*

*... La MSP est une méthode préventive qui vise à amener le procédé au niveau de qualité requis et à l'y maintenir grâce à **un système de surveillance** qui permet de **réagir rapidement et efficacement** à toute dérive, en évitant **ainsi la production massive** de produits non conformes. Cette méthode s'appuie plus particulièrement sur les méthodes statistiques.*

Dans cette définition, on peut souligner que les méthodes statistiques, sur lesquelles s'appuie la MSP, jouent un rôle de support à la prise de décision concernant les actions à mener pour régler, maintenir et améliorer le processus de fabrication. Elles permettent d'évaluer statistiquement, à partir des données récoltées, l'état actuel et futur du processus et de ses performances. Ces résultats statistiques sont utiles uniquement lorsqu'ils sont associés à des règles de décision qui orientent les actions. Tout un système d'information est nécessaire pour récolter, traiter et stocker les données et restituer les résultats.

Plusieurs techniques et outils ont été développés dans le cadre de la MSP. Ils ont été au départ dédiés aux systèmes manufacturiers, mais très rapidement ils sont devenus applicables dans tous les domaines grâce, entre autres, au développement de Management Total de la Qualité [Pillet, 2005, Montgomery, 2005, Oakland, 2007]

La recherche scientifique en liaison avec les techniques de MSP est toujours aussi abondante depuis qu'elle a été introduite par W. A. Shewhart⁴ avec les cartes de contrôle [Shewhart, 1931].

Cependant, il existe toujours un déphasage entre les avancées théoriques de ce domaine et leurs applications réelles. Les questions de pertinence et le futur de la MSP ont aussi fait l'objet de nombreuses discussions (par exemple, [Stoumbos et al., 2000, Woodall, 1999, Woodall, 2000]).

Néanmoins, certains secteurs, comme l'industrie chimique et celle des semi-conducteurs, ont profité plus que d'autres de ces avancées et ont su contribuer à leur développement.

4. Walter Andrew Shewhart, physicien statisticien américain (1891-1967). Embauché en 1918 à la Western Electric Company, transféré en 1925 aux Bell Telephone Laboratories où il a développé ses travaux sur les cartes de contrôle.

Comme nous l'avons déjà signalé dans l'introduction, les contrôles abusifs peuvent avoir des effets négatifs sur les performances du processus vu leur impact sur le temps de cycle et aussi les éventuelles actions correctives fautives qui peuvent dérégler le processus. Ces dernières sont dues aux fausses alarmes qui augmentent, systématiquement, avec le nombre de contrôles. L'évaluation des performances des systèmes de production intégrant des outils de MSP a fait l'objet de quelques recherches parmi lesquelles nous pouvons citer celles de [Colledani et Tolio, 2009, Colledani et Tolio, 2010]. Ils analysent principalement l'effet des files d'attente devant les machines de mesure et des actions correctives issues des cartes de contrôle sur quelques indicateurs de performance de production. Leurs résultats montrent qu'il ne suffit pas d'augmenter le nombre de machines de mesure (pour diminuer les encours) et faire des améliorations locales sur certaines machines de production. Pour améliorer les performances des processus, il est nécessaire de faire une conception intégrée de la qualité et de la logistique interne de production.

4.2 La variabilité et la capacité

4.2.1 La variabilité

L'aspect le plus pertinent pour qualifier la qualité d'un produit est le degré de sa conformité aux spécifications et aux tolérances requises par la conception et par l'utilisation prévue. Les caractéristiques qui permettent de vérifier cette conformité sont considérées comme les caractéristiques de qualité du produit.

Comme un processus de fabrication réel ne peut jamais produire deux produits parfaitement identiques, ces caractéristiques de qualité vont varier d'une réalisation à une autre du même produit. Cette variation inhérente à chaque produit est l'un des obstacles majeurs à la qualité et est son opposé, c'est la variabilité. En effet, plus ces variations sont importantes, plus elles peuvent conduire à des produits non conformes. Pour augmenter la chance de fabriquer des produits de qualité, il est alors nécessaire de réduire la variabilité du processus de fabrication. Pour cela, il est nécessaire de caractériser et évaluer la variabilité pour pouvoir agir sur le processus et sur les causes de variations.

La variabilité globale d'un processus peut venir de n'importe quelle combinaison des 5 composants élémentaires du processus de fabrication : la machine, la main d'œuvre, la méthode, le milieu et la matière d'œuvre d'entrée [Pillet, 2005]. Ces 5 composants sont à la base de la méthode 5M qui est utilisé dans la résolution des

problèmes qualité, qui est aussi connue sous le nom de digramme d'Ishikawa⁵ ou diagramme en arrête de poisson.

Comme les vrais paramètres caractérisant la variabilité d'un processus de fabrication sont généralement inconnus, des mesures sur les caractéristiques de qualité sont effectuées sur des échantillons du produit pour les estimer à partir de ces données. Les estimations des paramètres peuvent être discrètes et ponctuelles (une valeur estimée du paramètre) ou sous forme d'intervalles de confiance (intervalle de valeurs avec une probabilité).

La variabilité est généralement représentée par la dispersion des valeurs de la caractéristique considérée. Lorsque la variabilité a des causes indépendantes, le théorème central limite permet de déduire que la répartition globale de la variabilité est sous forme de cloche de la loi normale quelle que soient les lois de variations des causes vues individuellement (voir Figure 2.4).

Lorsque la dispersion est due à la variabilité inhérente au processus, la variabilité est dite aléatoire ou « normale ». Elle est dite « anormale » lorsque un changement important et brusque de la dispersion (ou dérive) est constaté, changement dû à une cause assignable (identifiable) dont on peut préciser l'origine.

La variabilité aléatoire est estimée et sert de référence pour surveiller le processus et détecter les éventuelles dérives. Elle est aussi utilisée pour juger du degré de capabilité (d'aptitude) du processus à être conforme aux spécifications.

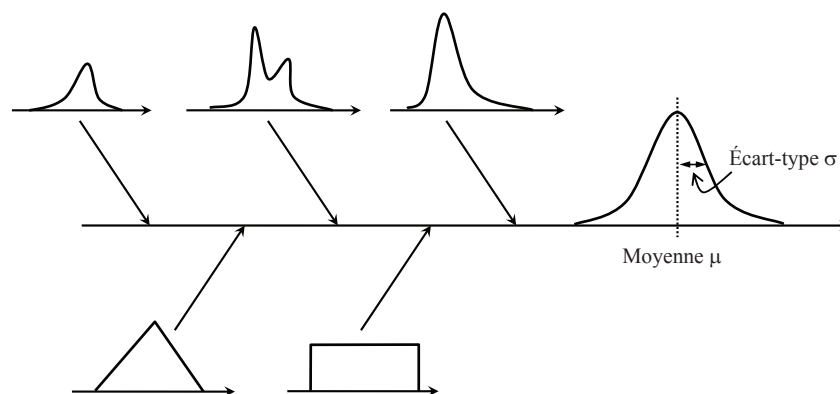


FIGURE 2.4 – Illustration du théorème central limite

5. Kaoru Ishikawa (1915-1989), ingénieur chimiste japonais qui a inventé diagramme de causes et effets qui est un des outils les plus utilisés pour assister les cercles de qualité

4.2.2 La capabilité

La notion de capabilité est introduite pour répondre à la question suivante : est-ce que le processus est oui ou non adapté aux exigences du produit qu'il est censé fabriquer ?

La capabilité, de façon générale, est le ratio entre l'intervalle de tolérances ($IT = LS - LI$) de la caractéristique qualité et la variabilité du processus vis à vis de cette caractéristique. Les limites inférieures (LI) et supérieures (LS) peuvent correspondre aux limites naturelles du processus (Dispersion correspondant à k fois l'écart-type du processus lorsqu'il est assujéti seulement à des causes non-assignables) ou à des limites de spécification. Différents indices peuvent être calculés pour qualifier la capabilité intrinsèque et réelle du processus à court ou à long terme (CT et LT). La différence entre les indices à court terme et à long terme se situe dans l'horizon sur lequel ont été prélevées les données utilisées pour le calcul.

– Capabilité intrinsèque à court terme

$$Cp = \frac{IT}{6\sigma_{CT}}$$

– Capabilité intrinsèque à long terme

$$Pp = \frac{IT}{6\sigma_{LT}}$$

– Capabilité réelle à court terme

$$Cpk = \frac{\min\{m_{CT} - LI; LS - m_{CT}\}}{3\sigma_{CT}}$$

– Capabilité réelle à long terme

$$Ppk = \frac{\min\{m_{LT} - LI; LS - m_{LT}\}}{3\sigma_{LT}}$$

Pour illustrer la notion de dérive et la différence entre capabilité intrinsèque et réelle, prenons l'exemple de la Figure 2.5 d'un processus ayant trois dispersions dans trois cas différents. Dans le cas 1, le processus est centré sur la cible avec une capabilité intrinsèque égale à sa capabilité réelle $Cp^1 = Cpk^1$. Dans le cas 2, où le processus a dérivé de la cible par δ_{m1} en gardant le même écart-type $\sigma_2 = \sigma_1$, bien que la capabilité intrinsèque reste inchangée par rapport au cas 1, le processus

perd de sa capabilité réelle qui sera diminuée de la quantité ΔCpk^2 .

$$\Delta Cpk^2 = Cpk^1 - Cpk^2 = \frac{Cible + \delta_{m1} - LI}{6\sigma_1}$$

Le cas 3, correspondant à une dérive de l'écart type par δ_{σ_1} , engendre aussi une perte de capabilité (intrinsèque et réelle) qui dévient ρ_{Cpk^3} fois plus petite que sa capabilité dans le cas 1.

$$\rho_{Cpk^3} = \frac{Cpk^1}{Cpk^3} = \frac{\sigma_1 + \delta_{\sigma_1}}{\sigma_1}$$

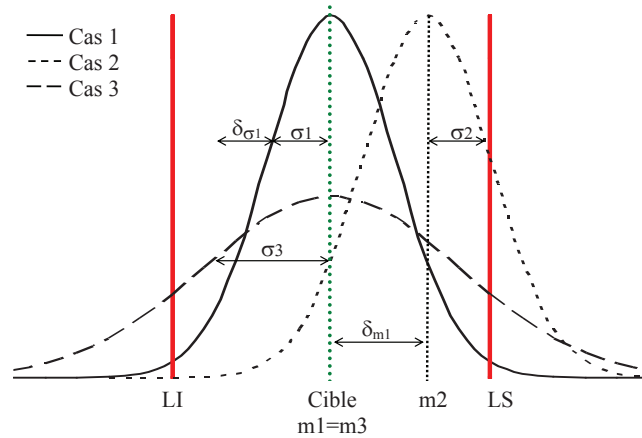


FIGURE 2.5 – Deux formes de dérive d'un processus

Un autre indicateur de capabilité permettant d'agréger la capabilité intrinsèque et réelle peut être aussi utilisé pour juger de l'aptitude du processus. Il se base sur la fonction de perte de Taguchi⁶ (voir Figure 2.6) qui stipule que plus on est éloigné de la cible, plus les pertes potentielles sont élevées. En effet, une dispersion réduite (capabilité intrinsèque élevée) ne garantit pas forcément la satisfaction du client si la production n'est pas centrée sur la cible bien que la quasi-totalité de ce qui est fabriqué respecte les tolérances. Cet indice de capabilité noté Cpm , souvent appelé indice de Taguchi, est inversement proportionnel à la distance entre la moyenne du processus et la cible et intègre de la même façon la séparation entre capabilité intrinsèque et réelle :

$$Cpm = \frac{IT}{6\sqrt{\sigma^2 + (Cible - m)^2}}$$

6. Genichi Taguchi est un ingénieur et statisticien japonais (née en 1924), il a développé, dans les années 50, une méthode statistique pour réaliser des plans d'expérience dont l'objectif est se concentrer avant tout à minimiser les variations autour de la valeur cible

$$C_{pmk} = \frac{\min\{m - LI; LS - m\}}{3\sqrt{\sigma^2 + (Cible - m)^2}}$$

Cette présentation des indicateurs de capabilité s'est limitée aux indicateurs les plus connus. Une revue comparative, assez complète, des différents indices de capabilité a été effectuée par [Wu et al., 2009]. Les comparaisons, effectuées selon plusieurs critères liés au rendement et à l'efficacité des moyens de production, montrent certains des avantages de l'utilisation de l'indice C_{pmk} comparé aux indices C_{pk} et cpm en terme de rendement et de maîtrise des pertes. D'autres indicateurs existent pour les cas où les tolérances ne sont pas symétriques, le cas où la variabilité ne suit pas une loi normale et le cas multi-varié ([Stoumbos, 2002, McCormack et al., 2000, Anis, 2008])

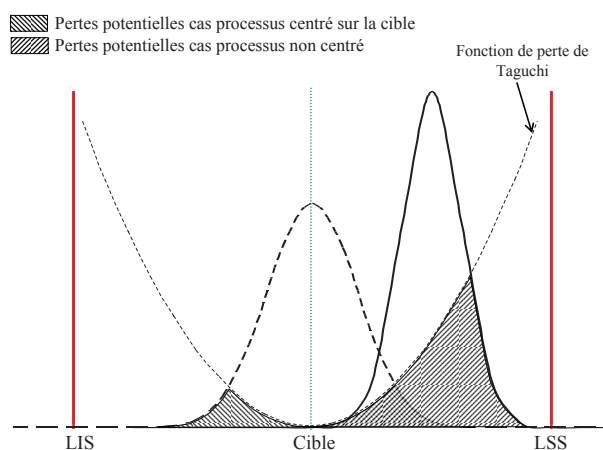


FIGURE 2.6 – Illustration de la fonction de pertes de Taguchi et de l'importance de centrage du processus

4.3 Les cartes de contrôle

Une carte de contrôle est un outil graphique de surveillance de processus qui trace l'évolution d'une statistique relative à un ou plusieurs paramètres du processus pour juger de son état. En général, le processus peut avoir deux états exclusifs : sous-contrôle ou hors-contrôle. Ces états du processus correspondent à deux zones du graphique qui sont délimitées par les limites de contrôle inférieure et supérieure (LCI et LCS, voir Figure. 2.7). Les limites de contrôle sont fixées de telle sorte que si le processus est statistiquement sous contrôle, presque tous les points d'échantillonnage seront situés entre elles. Les points qui sont tracés en dehors de ces limites sont interprétés comme la preuve que le processus

est hors-contrôle. Dans ce cas, il faut arrêter le processus et le régler pour éviter qu'il continue à fonctionner dans un état où il risque fortement de produire des non-conformités.

Il existe plusieurs types de cartes de contrôle qui peuvent être utilisées pour la surveillance des caractéristiques de qualité des produits d'un processus. Une carte peut contenir une à deux statistiques relatives à la caractéristique qualité surveillée. La carte de contrôle de la moyenne et de l'étendue (carte moyenne-étendue noté aussi \bar{X} -bar/R), proposée par Shewhart ([Shewhart, 1931]), est probablement la plus utilisée. Il existe deux grandes familles de cartes de contrôle selon la nature de données utilisées :

- **Cartes de contrôle aux mesures** : les données utilisées sont continues, issues des mesures de grandeurs physiques telle que : température, distance, etc. ;
- **Cartes de contrôle aux attributs** : les données utilisées sont discrètes et qualitatives, issues de processus de comptages tel que : nombre de non-conformités dans un lot, nombre de défauts dans un produit, etc. Une étude bibliographique sur ces cartes est effectuée par [Woodall, 1997].

Les cartes de contrôle sont aussi classifiées selon le nombre de caractéristiques surveillées. Elles sont dites « mono-variées » s'il s'agit d'une seule caractéristique et « multi-variées » s'il y en a plusieurs.

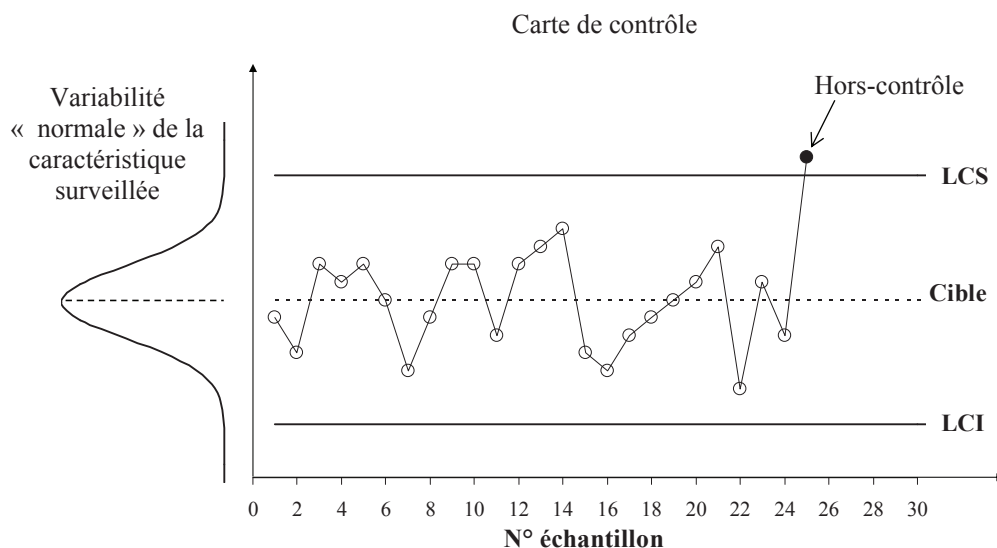


FIGURE 2.7 – Carte de contrôle de la moyenne

4.3.1 Conception des cartes de contrôle : économique, statistique,...

Quelque soit le type de carte de contrôle utilisé, l'application pratique nécessite la définition des paramètres de la carte utilisée qui sont : les limites de contrôle, la fréquence de l'échantillonnage et la taille de l'échantillon à prélever.

Les premières cartes de contrôle ont été conçues avec des approches purement statistiques. Les limites de contrôle sont généralement fixées dans le but d'avoir des taux de non-détection et de fausses détections maîtrisés. En effet, plus la zone entre les limites de contrôle est large, plus faible est le taux de fausses détections et plus fort est le taux de non-détection et vis-versa. Ces limites correspondent aux frontières de la région d'acceptation, avec une probabilité d'erreur fixée, d'un test d'hypothèse sur l'état du processus : sous-contrôle ou hors-contrôle.

Le choix de la taille d'échantillon dépend de l'importance des dérives à détecter. La détection d'une cause assignable provoquant une dérive importante de la variabilité du processus nécessite un échantillon plus petit que le cas où la cause ne provoque d'une petite dérive. Par contre, une petite taille d'échantillon augmente le nombre moyen de prélèvements entre l'instant d'occurrence de la dérive et sa détection par la carte de contrôle. Cette quantité est l'un des critères de performance d'une carte de contrôle appelée Période Opérationnelle Moyenne hors-contrôle notée POM_1 (en anglais out-of-control Average Run Length notée ARL_1). On définit, aussi la Période Opérationnelle Moyenne sous-contrôle notée POM_0 (en anglais in-control Average Run Length notée ARL_0) comme étant le nombre moyen de prélèvements entre deux détections successives (vraies ou fausses).

Le choix de la fréquence d'échantillonnage est effectué en fonction d'un autre critère de performance statistique d'une carte de contrôle qui est le Temps Moyen de Détection (en anglais Average Time to Signal noté ATS). C'est le produit de POM par la période d'échantillonnage : $ATS = ARL \cdot h$. Plus le ATS est grand, plus le risque de pertes dues à une dérive est important. Cela signifie que pour diminuer l'exposition à ce risque il faut baisser le ATS en diminuant h ou en augmentant la taille de l'échantillon. Par contre cela peut ne pas être envisageable par manque de ressources de mesure ou par souci de cadence de production et de temps de cycle qui peuvent être fortement impactés.

Bien que les cartes de contrôle de Shewhart ne soient pas efficaces pour détecter les petites dérives, elles restent très utilisables au moins dans une première phase de mise en place de la MSP. En effet, au début d'exploitation d'un nouveau processus, il a plus de chance d'avoir des causes assignables avec des variations importante [Montgomery, 2005, Ch. 8]. De plus, lorsqu'un nouveau processus est

mis en place ou lorsqu'on industrialise un nouveau produit, il est intuitivement plus urgent de s'occuper des « gros » problèmes pour les résoudre avant de pouvoir aller vers la recherche de l'excellence. Elles peuvent aussi être utilisées comme un outil d'aide au diagnostic par l'analyse des tendances qui peuvent apporter des informations utiles pour trouver les causes assignables.

L'inconvénient majeur des cartes de Shewhart réside dans leur lenteur à détecter des faibles dérives. Même s'il est possible d'améliorer la sensibilité de ces cartes aux petites dérives, en jouant sur les limites de contrôle, cela engendre une augmentation du taux de fausses détections qui sont indésirables lorsque le processus est dans une phase où il a plutôt tendance à se stabiliser après avoir détecté et traité les causes assignables les plus gênantes. Cet inconvénient vient du fait que ces cartes ne s'intéressent qu'à l'information apportée par le dernier échantillon. Une première réponse à cet inconvénient a été apportée par l'utilisation de règles supplémentaires connues sous le nom de « Western Electric Rules ». Ces règles consistent à diviser la zone de contrôle en plusieurs sous-zones qui caractérisent les limites d'application de ces règles dont les conditions d'application dépendent du nombre des points successifs tracés dans la même sous-zone. Certaines recherches ([[Champ et Woodall, 1987](#)] par exemple) ont modélisé les règles supplémentaires et analysé leurs effets sur l'efficacité des cartes de contrôle en termes de POM.

Dans le même but d'améliorer la détection des petites dérives, les cartes CUSUM (Cumulative Sum en anglais) et EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) présentent une alternative intéressante aux cartes de Shewhart. Le principe de la carte CUSUM consiste à tracer sur la carte de contrôle non plus la statistique (moyenne, écart-type,...) calculée sur le dernier échantillon, mais le cumul de la déviation de la statistique de tous les échantillons précédents. La carte EWMA, utilise aussi les résultats des échantillons précédents en calculant à chaque itération une moyenne pondérée des observations donnant plus de poids aux plus récentes.

Les cartes de contrôle ont été d'abord conçues avec la perspective d'une efficacité statistique liée aux valeurs de POM sous-contrôle et hors-contrôle pour des petites ou des grandes dérives du processus. Mais, les conséquences de coûts engendrés par l'utilisation des cartes de contrôle, a provoqué la nécessité de prendre en compte des aspects économiques dans leurs conception.

La conception économique des cartes de contrôle a été initiée par [[Duncan, 1956](#)] qui est le premier à proposer un modèle d'optimisation des paramètres d'une carte de contrôle de la moyenne de Shewhart. Le problème d'optimisation

consiste à trouver les paramètres de la carte de contrôle qui maximisent le gain net moyen par unité de temps d'un cycle de contrôle. Le cycle commence par un processus sous-contrôle et se termine par l'instant où le processus est remis sous contrôle. Le modèle suppose que le processus n'est pas arrêté pendant la phase de recherche de cause et néglige les coûts de réglage et de remise en route. Plusieurs travaux se sont intéressés à trouver des algorithmes de résolution du modèle de Duncan parmi lesquels nous pouvons citer [Ladany, 1973, Chiu et Wetherill, 1974]. La conception économique s'est ensuite étendue aux cartes de contrôle par attribut, aux cartes CUSUM, aux cartes multi-variées et à la conception économique conjointe des cartes de contrôle de la moyenne et de l'étendue (\bar{X}/R). Un modèle unifié de conception économique de cartes de contrôle a été proposé par [Lorenzen et Vance, 1986]. Ce modèle présente l'avantage d'être robuste face aux variations du coût de hors-contrôle et aux variations du temps moyen d'arrivée d'une cause assignable. Quelques reproches de l'approche économique de conception des cartes de contrôles ont été communiquées concernant son impact sur les performances statistiques [Woodall et al., 1986]. Ces critiques, n'ont pas empêché l'abondance des travaux de recherche dans ce domaine qui ont essayé d'améliorer le modèle de Lorenzen et Vance et de l'adapter à des cas spécifiques. Par exemple, [Baud-Lavigne et al., 2010] proposent une adaptation de ce modèle qui prend en considération la réutilisation des données de mesure dans l'analyse des rebuts. Dans ce cas, la carte de contrôle est utilisée à la fois pour surveiller le processus localement et pour apporter des informations sur chacune des étapes de fabrication.

4.3.2 Cartes de contrôle adaptatives

Une carte de contrôle bien conçue a la faculté de détecter rapidement les changements dans le processus et permet ainsi de savoir quand une action doit être entreprise sur le processus. Les cartes de contrôle standard, basées sur une approche statistique ou économique, utilisent une taille d'échantillon fixe prise à intervalle fixe entre les échantillons. Dans les cartes de contrôles adaptatives au moins un des paramètres la carte n'est plus fixe. Ce type de cartes peut être plus efficace que les cartes de contrôle standard ([Porteus et Angelus, 1997]), car elles utilisent les informations précédentes du processus pour déterminer la meilleure configuration de la carte à appliquer dans la période suivante.

La première carte de contrôle adaptative a été proposée par [Reynolds et al., 1988] pour le contrôle de la moyenne. Il s'agit d'une carte à intervalles d'échantillonnage variables (VSI pour « Variable Sampling Interval ») en fonction de la valeur de la moyenne de l'échantillon précédent. Ce travail a inspiré d'autres au-

teurs pour traiter d'autres formes de cartes adaptatives : [Prabhu et al., 1997, Silver et Rohleder, 1999, De Magalhães et al., 2001, Lin et Chou, 2005]. Une revue de la littérature des cartes de contrôles adaptatives a été faite par [Tagaras, 1998].

Plus récemment, des recherches se sont intéressées à la conception des cartes de contrôle où tous les paramètres sont variables : [De Magalhães et al., 2006, Jensen et al., 2008, De Magalhães et al., 2009].

La MSP est une collection des outils statistiques de résolution des problèmes avec un objectif unique : maîtriser le processus. La réussite de la MSP tient plus à l'atteinte de cet objectif qu'à l'apprentissage et l'utilisation de ces outils elles mêmes. La philosophie de la MSP est de gérer le processus avec des faits et des données et ne plus compter seulement sur des jugements.

Les cartes de contrôles, et les notions de variabilité et de capacité qu'elles évoquent, présentent un des outils fondamentaux de la MSP. Elles constituent une étape importante dans un programme de la MSP pour éliminer les causes assignables, réduire la variabilité des processus, et de stabiliser les performances des processus.

5 L'allocation et la planification des inspections

Puisque tout processus de fabrication est assujetti à la variabilité due à des causes assignables ou non, il est nécessaire, d'un point de vue qualité, que cette variabilité soit maîtrisée. La maîtrise signifie au moins que les causes non assignables sont traquées et éliminées. Pour assurer cette fonction de maîtrise, un ensemble de ressources sont à déployer et à gérer dans le cadre d'un programme d'assurance qualité. Ces ressources comprennent les ressources d'inspection (ou de mesure, instrumentée ou pas) dont nous avons mentionné certains développements précédemment, les ressources de traitement des données (filtrage, analyse), les ressources pour la prise de décision et les ressources pour agir sur le processus. Dans un processus manufacturier, il y a quatre types de mesures utilisés pour inspecter le produit ou le processus (voir Figure 2.8.)

L'inspection peut avoir un rôle de détection et/ou de diagnostic et/ou de tri selon le moment et l'endroit où elle a été effectuée et le moment où l'information qu'elle apporte est exploitée. Par conséquent, décider où et quand inspecter un processus de production sont deux problématiques importantes dans le contrôle de processus. Ces deux problématiques sont connues comme étant des problèmes d'allocation et de planification d'inspection. Différentes variantes de ces deux problématiques ont été traitées dans la littérature aux cours des cinq dernières

décennies.

[Lindsay et Bishop, 1964] constitue un des travaux initiateurs de ces problématiques. L'approche vise à définir à la fois la localisation (où) et le niveau (à quelle fréquence) des inspections dans une ligne de fabrication à plusieurs étapes en série avec une cadence moyenne fixe. L'objectif est de minimiser la somme des coûts engendrés par les inspections et les rejets éventuels des produits défectueux avec une contrainte de garantir qu'à la fin du processus la proportion de produits défectueux est inférieure un seuil. Cette stratégie est purement centrée sur le principe de tri multi-étages, car le processus est supposé dans un état stable (sous-contrôle) où les proportions des produits non-conformes sont fixes à chaque étape de fabrication. L'enjeu n'est pas de détecter des hors-contrôles pour régler le processus, c'est plutôt de sortir de la ligne de fabrication, le plus tôt possible, tout produit dont l'une des étapes antérieures a failli. Un tel produit, s'il continue sa route, va augmenter la proportion de produits non-conformes à la fin de la ligne. En plus, ceci va augmenter le coût moyen des produits conformes d'autant plus qu'un produit défectueux continue inutilement à subir les opérations des étapes

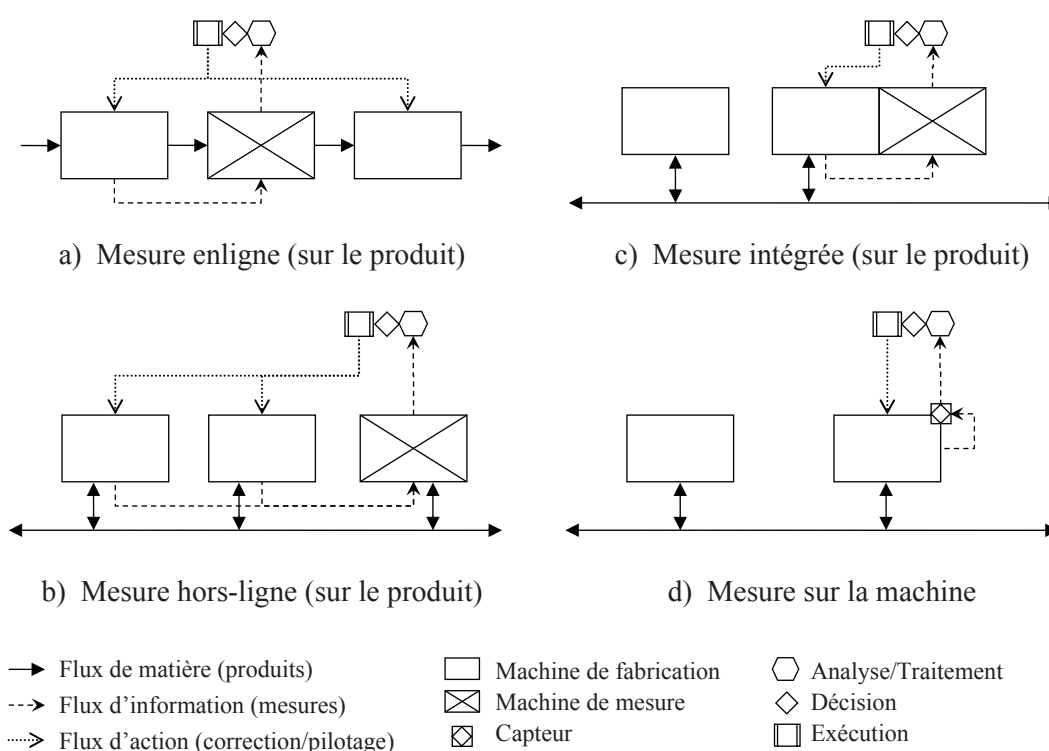


FIGURE 2.8 – Quatre types des mesures pour inspecter le produit et le processus

en aval de l'étape initiatrice de défaut. La méthode de résolution proposée par Lindsay et Bishop repose sur la programmation dynamique, car la décision de la quantité de produits à inspecter à une étape donnée du processus dépend des décisions prises pour les étapes antérieures. Ils démontrent aussi qu'avec une telle stratégie la résolution optimale se ramène seulement à la question de choisir à quelle étape inspecter. En effet, le niveau d'inspection optimal pour chaque étape ne peut avoir que deux valeurs : 0 % ou 100 %. Une formalisation similaire a été proposée par [Eppen et Hurst, 1974] en prenant en compte les erreurs d'inspection (rejeter un produit conforme et accepter un produit non-conforme). Ce dernier paramètre était souvent omis dans les premiers modèles d'allocation d'inspection qui ont traité majoritairement des configurations série (voir [Raz, 1986]). Beaucoup de ces modèles ont intégré la décision supplémentaire concernant les produits non-conformes (réparation, rejet, répétition de l'opération) et ce qu'elle engendre au niveau de la fonction coût ([Rebello et al., 1995, Bai et Yun, 1996]).

Le premier à traiter le cas de processus non-série était probablement [Britney, 1972] qui présente une généralisation du modèle de Lindsay et Bishop avec un système qui contient des étapes en parallèle et des étapes d'assemblage. Il résout le problème en le formalisant sous forme d'un programme non-linéaire à variables binaires (0-1) et en utilisant une technique énumérative qui explore tout l'espace des solutions possibles.

[Emmons et Rabinowitz, 2002] ont proposé un modèle original d'allocation des inspections dans un système série. Leur formalisation du problème met l'accent sur l'interaction entre ce problème avec l'ordonnancement des inspections. En effet, l'objectif est de déterminer le nombre de stations d'inspection, l'affectation des étapes processus sur l'ensemble des stations d'inspection et l'ordonnancement des inspections au sein d'une station d'inspection qui minimise le coût des stations d'inspection et le coût associé aux pertes des produits défectueux. La méthode de résolution proposée consiste à résoudre de façon hiérarchique trois sous problèmes : 1) optimisation du nombre de stations d'inspection et des taux d'inspection de chaque étape de processus 2) utiliser les résultats obtenus dans 1) pour allouer chaque station à un sous-ensemble des étapes de processus et 3) trouver le meilleur ordonnancement des inspections de chaque station.

Les systèmes de production à flux réentrant présentent une spécificité par rapport aux problèmes d'allocation des systèmes à flux unidirectionnel. Dans cette configuration, un produit inspecté qui se révèle être défectueux peut être retravaillé en réexécutant l'opération qui a échoué. La possibilité de retravailler un produit défectueux est de plus en plus prise en compte dans

la littérature (exemples : [Narahari et Khan, 1996, Hong et al., 1998, Shiau, 2002, Rau et al., 2005, Rau et Cho, 2009])

Les inspections peuvent avoir un rôle purement orienté diagnostic qui permet de trouver les causes de variation d'un paramètre du processus. Il s'agit, en général, de positionner physiquement un ensemble des capteurs qui vont permettre ensemble de mesurer le paramètre du produit ou du processus en question. Dans ce cas, l'allocation des inspections consiste à les positionner de façon à optimiser des fonctions objectifs liées à l'observabilité, la diagnosticabilité, la précision, la sensibilité, etc. Les applications sont très larges et touchent des domaines très variés, autres que le domaine manufacturier, comme la médecine, le génie civil, la télécommunication, etc. [Wang et Nagarkar, 1999, Worden et Burrows, 2001, Liu et al., 2005]

Pour avoir plus de références sur les problématiques très variées de l'allocation des inspections, nous conseillons au lecteur de consulter les revues de littérature de [Mandrolì et al., 2006, Shetwan et al., 2011]

Concernant la planification des inspections, le but est souvent de répondre à la question suivante : comment utiliser au mieux les ressources d'inspection disponibles ? là aussi, les outils et les techniques utilisés diffèrent selon le rôle et la nature de l'inspection en question [Dodge et Romig, 1929].

Lorsque l'inspection se fait sur le produit, et est non-destructive, avec un rôle purement de tri, l'inspection à 100% est l'unique solution. Si l'inspection se fait dans un but de garantir un niveau moyen de qualité en sortie de processus (AOQ : Average Outgoing Quality), les solutions proposées se basent sur l'inférence statistique pour définir les stratégies d'échantillonnage adéquates. [Dodge, 1943] est le premier à proposer un plan d'échantillonnage d'un système de production continu (appelé en anglais Continuous Sampling Plan, noté CSP). C'est un plan d'inspection dynamique qui alterne entre une inspection à 100% et une inspection à intervalle fixe égal à $1/f$ et où les produits inspectés défectueux sont remplacés par des produits conformes. Le passage du premier cas au deuxième cas se fait lorsque i produits inspectés successivement sont non défectueux. Le retour à une inspection à 100% est effectué au premier produit défectueux : c'est le plan CSP-1. Le plan d'inspection est noté CSP-2 lorsque le retour à une inspection à 100% est conditionné par la découverte d'un deuxième produit défectueux dans les k inspections succédant le premier produit défectueux. Dans la même esprit ont été proposés les plans CSP-3, CSP-4 et CSP-5 qui ont été évalués par [Yang, 1983]. Plus récemment, le plan CSP-C, qui généralise le plan CSP-1 de Dodge, a été proposé par [Stephens, 1986] et évalué par

[Govindaraju et Kandasamy, 2000]. Ce plan est semblable à CSP-1 sauf que le retour à une inspection 100% est conditionné par la constatation d'un cumul de $(c + 1)$ produits défectueux. [Lieberman et Solomon, 1955] a introduit les plans d'échantillonnage multi-niveaux (MLP : Multi-Level continuous inspection Plan). Il s'agit de plan inspection où le taux d'échantillonnage alterne entre les niveaux définis par les fréquences d'échantillonnage $f_0 = 1 > f_1 > \dots > f_r > \dots > f_k$. Le passage d'un niveau r à un niveau $r + 1$ (avec $r + 1 = k$ si $r = k - 1$ ou $r = k$) est conditionné par la succession de i produits non défectueux. Le retour à un niveau inférieur est toujours effectué au premier produit défectueux.

Cependant, définir une stratégie d'inspection avec un simple rôle de tri (sans envisager des actions de correction et/ou d'amélioration du processus) pour garantir un niveau élevé de l'AOQ devient rapidement trop cher et peut devenir un frein à la compétitivité. En effet, une telle stratégie n'est pas suffisante (voire contre productive) dans un contexte où une entreprise fait la chasse aux gaspillages (« lean manufacturing ») et cherche à tendre vers le « zéro-défaut ». De ce contexte, il est plus que jamais nécessaire d'utiliser les inspections dans une fonction de contrôle du processus afin de maîtriser ses sources de variabilité et d'optimiser ses performances. Une solution est donc de contrôler le processus de production et de trier au plus près de la production de défaut.

Lorsque les inspections (effectuées sur le produit ou sur le processus) ont un rôle lié au contrôle de processus (détection et/ou diagnostic) la planification des inspections consiste à définir les dates d'inspection qui optimisent une fonction économique (ou son espérance mathématique) qui tient compte des coûts d'inspections et des coûts engendrés par le processus lorsqu'il passe dans un état où il n'est pas sensé être. Ces problématiques ont été traitées, dans la majorité des cas séparément, d'un point de vue contrôle de processus et d'un point de vue maintenance.

La planification des inspections d'un point de vue contrôle de processus a été abordé dans la conception des cartes de contrôle avec ses approches statistiques et économiques. En effet, les paramètres n , la taille de l'échantillon, et f , la fréquence d'échantillonnage, d'une carte de contrôle constituent déjà un plan d'inspection à effectuer sur le produit pour mesurer une caractéristique de qualité de produit et en déduire l'état du processus statistiquement. Ces modèles supposent qu'une fois un état de hors-contrôle détecté, la cause de dérive est diagnostiquée et le processus est ramené à son état initial sous-contrôle par une action sur les causes assignables de variabilité. Les développements effectués en conception économique, statistique ou statique-économique des cartes de contrôles sta-

tique ou adaptatives n'ont pas toujours tenu compte de la contrainte de capacité de ressources disponibles pour effectuer les mesures et les actions correctives. [Rohleder et Silver, 2002], qui est parmi les premiers à considérer cette contrainte, a montré que les cartes de contrôle de Shewhart peuvent avoir des plans optimaux sensiblement différents des solutions qui ne considèrent pas cette contrainte. La méthode de résolution qu'il propose se base sur la relaxation Lagrangienne qui a comme principe d'intégrer la contrainte à la fonction objectif originale (sans contrainte) en pénalisant plus les solutions qui violent le plus la contrainte de capacité. La solution trouvée est une borne inférieure qui, si elle n'est pas elle-même la solution optimale, donne une idée sur la capacité à rajouter pour améliorer les performances de la carte de contrôle avec un moindre effort supplémentaire. La prise en compte de contraintes de capacité a été aussi traitée dans [Wu et al., 2006, Shamsuzzaman et al., 2009] où les auteurs proposent d'associer aux cartes de contrôle classiques (\bar{X} , S) une carte de contrôle de l'effort (M) qu'une ressource doit consacrer aux activités SPC. L'optimisation conjointe de ces cartes permet de définir des plans d'inspection (n, h) qui permet de définir la meilleure façon d'utiliser les ressources disponibles pour minimiser le coût total moyen d'un système contrôlé avec des cartes SPC. Récemment, le cas des cartes de contrôles adaptatives conçu avec prise en compte de contrainte de capacité de ressources de contrôle a été traité par [Celano, 2009].

La planification des inspections d'un point de vue maintenance a été largement étudiée dans le cadre de l'optimisation de la maintenance conditionnelle et prédictive. Le but est de trouver la stratégie de maintenance qui minimise à la fois les coûts de maintenance et les coûts des inspections. Les coûts de maintenance intègrent souvent les coûts associés à la réparation selon l'état de dégradation du système et les coûts des éventuelles défaillances dans les cas où les dégradations ont dépassé le seuil fonctionnel. L'état du système (niveau de dégradation, état de défaillance) n'est connu qu'après inspection. Ces dernières années, il ya eu des développements significatifs dans le domaine de la planification des inspections basée sur la fiabilité des structures complexes, telles que les plateformes pétrolières en mer, les routes et ponts. Divers outils et méthodologies ont été développés pour l'analyse de la fiabilité de fatigue et de la politique de maintenance pour élaborer des plans d'inspection optimaux [Onoufriou, 1999, Smilowitz et Madanat, 2000, Straub et Faber, 2005]. La motivation de ces développements a été l'optimisation des dépenses de maintenance en garantissant les meilleurs niveaux de sécurité. L'optimisation de la maintenance conditionnelle et prédictive a été traitée pour tout système qui peut être sujet à des défaillances graduelles stochastiques où les inspections sont nécessaires pour

évaluer l'état du système et entreprendre, si nécessaire, la maintenance adéquate. Les modèles proposés se sont focalisé plutôt sur la modélisation du processus de dégradation et la définition des zones de dégradation qui correspondent à des actions de maintenance différentes (pas de maintenance, maintenance préventive, maintenance corrective) [Luss, 1976, Abdel-Hameed, 1987, Park, 1988, Chelbi et Ait-Kadi, 2000, Grall et al., 2002a, Abdel-Hameed, 2004]. Le plan d'inspection (fréquence) a une influence non négligeable sur la qualité de la solution en termes de coût total moyen de la stratégie de maintenance optimale (voir par exemple [Coolen et Dekker, 1995, Grall et al., 2002b, Deloux et al., 2009]). La manière d'optimiser les intervalles d'inspection a été discutée dans [Wang, 2000, Wang, 2003, Golmakani, 2011].

6 Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques outils et techniques utilisés pour assurer la fonction contrôle de processus. Une grande variété des problématiques dans ce domaine ont été traitées séparément permettant des importantes avancées. Néanmoins, nous constatons que ces travaux ont souvent négligé les contraintes des ressources limitées de contrôle. De plus, rares sont les travaux qui ont cherché une intégration globale des activités de contrôle de processus et leurs interactions avec les autres activités opérationnelles afin de garantir des niveaux de performance optimisés.

Chapitre

3

UN POINT DE VUE ASSURANTIEL DE CONCEPTION DES PLANS DE SURVEILLANCE

Sommaire

1	Introduction	55
2	Les motivations pour une approche assurantielle	55
3	Une première formulation simplifiée	58
3.1	Notations	58
3.2	Hypothèses	59
3.3	Formalisation du problème	60
4	Une heuristique en deux étapes	65
4.1	Etape 1 : Plan de surveillance minimal basé sur la limite R_L	66
4.2	Etape 2 : Ajustement de plan de surveillance minimal pour optimiser la capacité et l'efficacité	67
4.3	Exemple illustratif	71
5	Analyses des effets des paramètres R_L et $CAPA$	77
6	Le contrôle opérationnel du MAR	82
6.1	Cas sans délais	83
6.2	Cas avec délais	85
7	Conclusion du chapitre 3	88

1 Introduction

La réussite de l'activité « contrôle de processus » est conditionnée par une bonne planification qui tient compte des objectifs en termes de maîtrise des risques, des contraintes liées aux ressources et des interactions entre le processus de contrôle et les autres processus opérationnels de l'entreprise.

Ce chapitre présente notre approche assurantielle de conception des plans de surveillance. Il s'agit d'une approche précautionniste qui se base sur la limitation de l'exposition au risque de perdre, d'un seul coup, une grande quantité de produit par manque de surveillance. Cette proposition a fait l'objet d'une publication dans un journal international spécialisé dans la recherche en production [Bettayeb et al., 2011a]

Dans la suite de ce chapitre, nous expliquons, tout d'abord, les motivations de considérer une telle approche pour concevoir un plan de surveillance. Ensuite, et dans le but d'avoir un premier modèle basé sur l'approche assurantielle qui soit facilement manipulable, nous présentons une formulation simplifiée qui va être ensuite résolue avec une méthode heuristique. Cette approche a été testée et évaluée avec un exemple provenant de ST Microelectronics à Crolles qui est notre partenaire industriel du projet dans la région.

2 Les motivations pour une approche assurantielle

Les systèmes de production dans certains secteurs industriels (et de service) peuvent présenter une certaine complexité structurelle et/ou organisationnelle rendant leur pilotage délicat et complexe. Le niveau de complexité ne dépend pas seulement du degré d'automatisation, mais aussi, et surtout, de nombre de boucles de rétroaction dans le système. En plus de cette complexité, les enjeux liés au temps de cycle, aux coûts de rebuts et à la rentabilisation des équipements de production sont des facteurs supplémentaires de pression sur les différents services de l'entreprise pour améliorer le processus de fabrication et le rendre robuste face aux aléas opérationnels. Ce qui est recherché étant de fabriquer des produits de qualité aux meilleurs coûts et juste à temps, les rebuts massifs et/ou la découverte tardive d'un défaut dans les dernières étapes du processus de fabrication représentent le cauchemar à éviter pour les industriels. Les défaillances qui sont à l'origine de telles pertes sont d'autant plus dévastatrices si elles ne sont pas détectées et éliminées rapidement. Une façon d'aborder ce problème consiste à définir une stratégie de contrôle qui regarde dans son ensemble les différents outils et techniques utilisées pour maîtriser le processus. Cette approche se veut

plus globale, plus macroscopique que celle consistant à se focaliser individuellement et localement sur chacun des outils ou des techniques comme les cartes de contrôle (approche microscopique). Cela signifie la nécessité de coupler des paramètres microscopiques de ces outils, tel que la POM_1 (Période Opérationnelle Moyenne hors-contrôle), avec au moins un indicateur macroscopique tel que le concept de Matériel à risque (MAR) qui permet de quantifier les pertes potentielles globales aux quelles on s'expose avec un plan de surveillance donné.

Connaitre et surveiller ces défaillances et leurs causes est le rôle joué par le plan de surveillance de processus. Il représente l'ensemble des méthodes et outils utilisés pour contrôler le processus sur quatre niveaux :

1. Au niveau outil : Détection et classification de défauts (FDC), Maintenance (curative, préventive et prédictive), etc.
2. Au niveau procédé : boucles de régulation, contrôle statistique (cartes de contrôle), etc.
3. Au niveau produit : inspection visuelle, tests paramétriques, contrôle de réception, etc.
4. Au niveau organisation : audits qualité, groupes de travail d'amélioration continue, démarches de résolution de problèmes tel que 8D¹ [Duret et Pillet, 2005]

Comme la finalité recherchée d'un processus est de produire conformément aux exigences qualité et avec un certain niveau de performance (coût et délai), ces outils et méthodes peuvent être considérés comme des barrières (ou couches de protection) aux défaillances (ou non-conformités) et souvent leurs causes tout au long de processus. Ces barrières sont conçues en utilisant différents approches : Déterministe, Stochastique, Économique, Statistique, Méthodologique, ... L'approche utilisée dépend essentiellement de la nature de non-conformité à traquer, de sa sévérité, de sa fréquence et de l'objectif de performance attendu de la barrière. Ces défaillances potentielles, appelés risques lorsqu'elles sont caractérisées par des incertitudes par rapport à des objectifs, sont recensées et évaluées en utilisant différentes méthodes d'analyse de risques tel que l'AMDEC, l'AdD², etc. Ces méthodes peuvent être quantitatives ou qualitatives, déductives ou inductives, mais ne sont en aucun cas exhaustives ni dépourvues d'erreurs d'évaluation. Pour ces raisons, une couche de protection n'est jamais imperméable à 100% et d'autant plus si elle est conçue avec une stratégie

1. 8 Disciplines (aussi appelé 8 Do), une démarche à 8 étapes pour résoudre un problème courant dans l'entreprise.

2. Arbre de Défaillances : représentation graphique mettant en évidence les relations de cause à effet, très utilisé dans les études de fiabilité pour calculer la probabilité d'un événement redouté

de contrôle par échantillonnage. Chaque couche aura une brèche locale qui laissera passer des défauts dans trois cas :

1. L'outil de contrôle n'est pas conçu pour contrôler le défaut,
2. Les défauts passent entre les instants de contrôle si ce dernier est fréquentiel
3. L'outil de contrôle utilisé a commis une erreur de non détection.

Afin de faire face aux brèches locales, la solution souvent proposée est de multiplier les couches de protection (voir Figure 3.1.) Cependant, comme toutes ces protections sont souvent conçues de manière indépendante, et par des organisations séparées (service qualité, service « process control », service maintenance,...), il n'y a pas de vision claire de la manière dont les risques sont réellement maîtrisés et par quelles couches de protection [Schippers, 2001]. Une combinaison de brèches locales peut se produire engendrant la non capture de défaillances majeures et donc une perte massive de produits [Shanthikumar, 2007]. De ce fait, la limitation des pertes massives semble donc un objectif global important à prendre en compte dans la conception d'un plan de surveillance qui intègre différents outils et techniques de contrôle de processus. Ceci passe par la maîtrise de l'incertitude sur les produits fabriqués, c'est-à-dire la quantité des produits fabriqués sur une période de temps où le processus n'est pas contrôlé. Le but est d'éviter de se trouver devant une perte massive qui risque de perturber les performances du processus global.

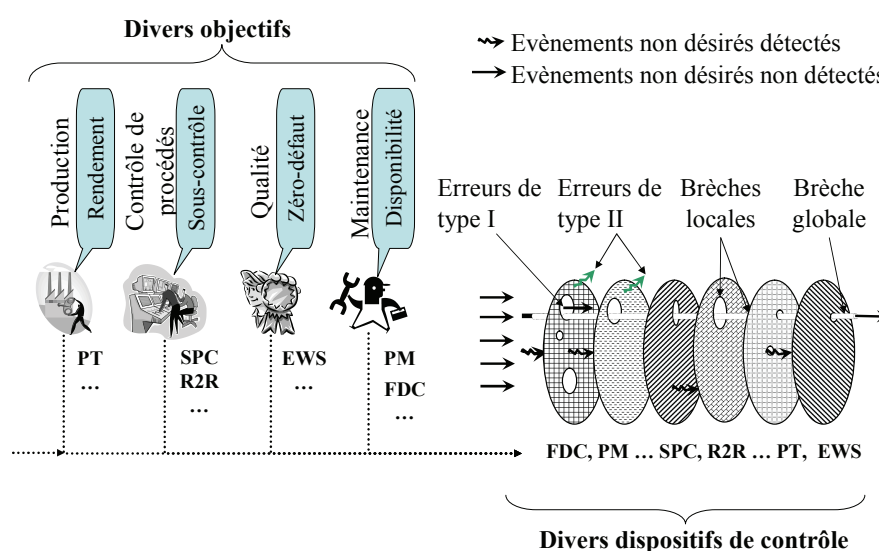


FIGURE 3.1 – Les brèches locales et globales des plusieurs couches de dispositifs de contrôles

3 Une première formulation simplifiée

L'approche assurantielle que nous proposons repose sur la notion de Matériel A Risque (MAR). C'est la quantité de produits fabriqués entre deux contrôles successifs effectués sur le processus. Le modèle proposé vise à contrôler le MAR dans le système de production tout en utilisant efficacement les ressources de contrôle disponibles. L'efficacité d'un contrôle se définit, de manière générale, par le rapport entre son aptitude à détecter et éliminer une défaillance durant le processus de fabrication et la quantité de ressources qu'il mobilise. Cette efficacité dépend essentiellement de la fréquence d'apparition de la défaillance, de l'aptitude de l'outil de contrôle à la détecter et de l'efficacité des actions correctives (ou de pilotage) mises en place. Cependant, l'efficacité des contrôles peut se limiter à un de ces critères comme elle peut être une agrégation pondérée de l'ensemble de ces critères. Pour expliquer cette notion d'efficacité de contrôle, prenons l'exemple simplifié de deux types de contrôle C1 et C2 qui peuvent être utilisés pour contrôler un processus vis-à-vis d'une défaillance λ . Si les deux contrôles utilisent les mêmes ressources d'action avec deux outils de mesure différents ayant un même temps de mesure, le contrôle le plus efficace est celui qui utilise l'outil de mesure le plus précis, car il a plus de chance de détecter la défaillance.

3.1 Notations

Pour pouvoir formaliser et résoudre le problème, les notations suivantes vont être utilisées :

- \mathcal{P} : Ensemble de produits à fabriquer, avec $Card(\mathcal{P}) = P$;
- p : Indice d'un produit, $p \in \mathcal{P}$;
- Q_p : Quantité à fabriquer du produit p ;
- \mathcal{I} : Ensemble des opérations de fabrication, avec $Card(\mathcal{I}) = I$;
- i : Indice d'une opération de fabrication, $i \in \mathcal{I}$;
- \mathcal{P}^i : Ensemble des produits qui contiennent l'opération i dans leur processus de fabrication ;
- \mathcal{I}^p : Ensemble des opérations de fabrication du produit p ;
- z : Indice d'un d'outil de fabrication ;
- \mathcal{Z} : Ensemble d'outils de fabrication ;
- \mathcal{Z}^i : Ensemble des outils de fabrication qualifiés pour l'opération i ;
- x : Un plan de surveillance quelconque, $x = (n, T)$;
- n : Nombre total de contrôles du plan de surveillance x ;
- T : Vecteur des dates de n contrôles, $T = (t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_n)$;
- k : Numéro de contrôle ;

- t : Variable de temps ;
 t_k : Date du kème contrôle, $k \in \{1, 2, \dots, n\}$;
 H : Horizon de production exprimant la quantité à fabriquer ;
 R_L : Limite d'exposition aux risques ou limite de résilience du système de production ;
 $MAR^0(t)$: Fonction de MAR avec le plan de surveillance de référence, $t \in [1, \dots, H]$;
 MAR_{max}^0 : Valeur maximale que peut atteindre le MAR durant l'horizon H lorsque le plan de surveillance de référence est appliqué, avec $MAR_{max}^0 = \max_t MAR^0(t)$;
 $MAR^x(t)$: Fonction de MAR lorsque le plan de surveillance x est appliqué, $t \in [1, \dots, H]$;
 MAR_{max}^x : Valeur maximale que peut atteindre le MAR durant l'horizon H lorsque le plan de surveillance x est appliqué ;
 AV^x : Valeur ajoutée du plan de surveillance x , c'est le gain en termes de MAR obtenu par rapport au plan de surveillance de référence, avec
 $AV^x = f_{AV}(MAR^0(t), MAR^x(t))$
 f_{AV} : Fonction d'évaluation de valeur ajouté d'un plan de surveillance. Quelques exemples de la fonction :
 $f_{AV_1}(MAR^0(t), MAR^x(t)) = MAR_{max}^0 - MAR_{max}^x$
 $f_{AV_2}(MAR^0(t), MAR^x(t)) = \int_0^H (MAR^0(t) - MAR^x(t))dt$
 $f_{AV_3}(MAR^0(t), MAR^x(t)) = \frac{1}{H} \int_0^H (MAR^0(t) - MAR^x(t))dt.$

3.2 Hypothèses

Hypothèse 1 : Le modèle permet d'allouer des contrôles et n'est pas limité à la mesure. Un contrôle peut être démarré par des mesures (ou inspections), et peut inclure toute mesure nécessaire pour soulever toute incertitude sur les produits ou les procédés (remesure, analyse, maintenance conditionnelle, tri ou mise en rebus de produits, etc.)

Hypothèse 2 : Un contrôle lève 100% de l'incertitude depuis le dernier contrôle sur les produits et sur le processus, $\forall t_i \in T \text{ } MAR^x(t_i^-) \neq 0$ et $MAR^x(t_i^+) = 0$ (voir Figure 3.2).

Hypothèse 3 : Il n'y a pas de retard sur un contrôle, par rapport à l'heure prévue dans le plan de la production. L'effet de contrôle est supposé immédiat.

Hypothèse 4 : Un contrôle ne présente pas de risque de non-détection ni de

fausse alarme associés à la mesure.

Hypothèse 5 : Le budget alloué pour assurer les conséquences des actions de contrôle est remboursé immédiatement, et toute la capacité consommée est automatiquement compensée. Les commandes n'ont aucun effet sur la limite de l'exposition au risque. Ceci est notée $R_L = \text{constante}$.

Hypothèse 6 : Chaque contrôle a une durée fixe. Cette hypothèse est au cœur de l'algorithme de partition.

Hypothèse 7 : la valeur initiale du MAR est égale à zéro, $MAR^0(0) = 0$.

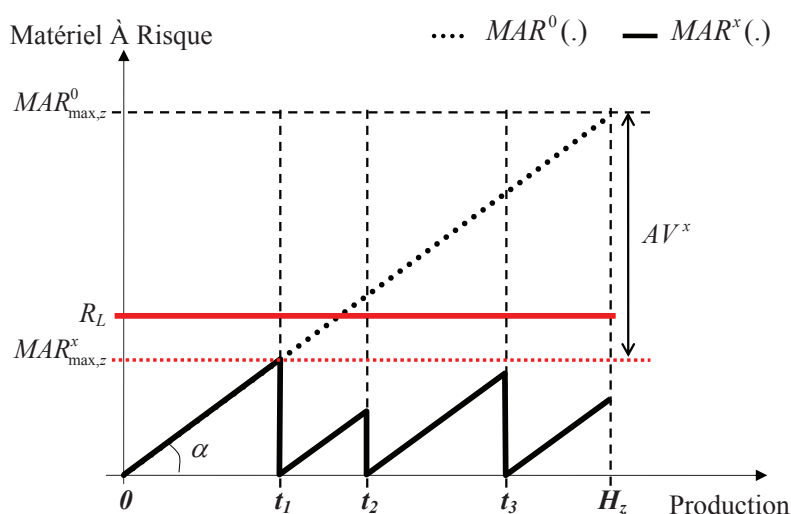


FIGURE 3.2 – Évolution du MAR et exemple de valeur ajoutée de plan de surveillance

3.3 Formalisation du problème

Les hypothèses citées précédemment représentent une stratégie simplifiée de contrôle de MAR comme suit : la production sur un outil de fabrication quelconque continue jusqu'à ce qu'un contrôle systématique soit effectué sur un produit. Un contrôle signifie une mesure immédiate du produit et une correction sans délai de l'outil si une dérive est détectée. Un MAR qui dépasse la limite d'exposition aux risques R_L , sur n'importe quel outil de fabrication, pourrait conduire à une perturbation majeure de la production si les pertes effectives se révèlent être égales à la valeur de MAR. Une perte en dessous de cette limite est considérée comme acceptable. Cette aptitude d'un système à retourner vers ses performances nominales suite à une perturbation est connue sous le nom de la résilience organisationnelle.

Le but est alors de définir un plan de surveillance qui permet de :

- (1) assurer qu'aucun outil de fabrication ne reste incontrôlé pendant un nombre d'exécutions supérieur à la limite de résilience R_L si les ressources de contrôle disponibles le permettent, et
- (2) assurer que les contrôles effectués soient les plus efficaces possible.

Afin de formaliser ce problème, les variables de décision et les paramètres utilisés sont les suivants :

- n_i : variable de décision (à optimiser) qui correspond au nombre de contrôles (entier positif) à effectuer sur l'opération $i \in \{1, \dots, I\}$;
- N_i : entier strictement positif relatif au nombre d'exécutions de l'opération i pendant l'horizon de planification considéré, avec

$$N_i = \sum_{p \in \mathcal{P}^i} Q_p \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}$$
 ;
- C_i : réel positif qualifiant l'efficacité d'un contrôle effectué sur l'opération i ;
- Ct_i : coût, exprimé en unités de temps, d'un contrôle effectué sur l'opération i ;
- $CAPA$: capacité totale, exprimé en unités de temps, des ressources de contrôle disponibles pendant l'horizon de planification considéré ;
- $DISP_{(i,z)}$: part prévisionnelle de la charge, relative à l'opération de fabrication i , attribuée à l'outil de fabrication z , avec

$$0 \leq DISP_{(i,z)} \leq 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall z \in \mathcal{Z}.$$

Le problème peut être formalisé sous forme du programme linéaire suivant :

La fonction objectif

$$(PCPS) \quad \text{Maximiser} \quad \sum_{i=1, \dots, I} n_i \times C_i \quad (3.1)$$

Les contraintes

$$(C1) \quad n_i \in \mathbb{N} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.2)$$

$$(C2) \quad n_i \leq N_i = \sum_{p \in \mathcal{P}^i} Q_p \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.3)$$

$$(C3) \quad \sum_{i \in \mathcal{I}} n_i \times Ct_i \leq CAPA \quad (3.4)$$

$$(C4) \quad \sum_{i \in \mathcal{I}} [n_i \times DISP_{(i,z)}] \geq \frac{\sum_{i \in \mathcal{I}} [N_i \times DISP_{(i,z)}]}{R_L} - 1 \quad \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.5)$$

Le problème de conception du plan de surveillance (PCPS) est de trouver le plan de surveillance $x^* = (n^*, T^*)$ qui permet de maximiser l'efficacité totale des contrôles, avec

$$n^* = \sum_{i \in \mathcal{I}} n_i^*$$

Les contraintes (C1) et (C2) assurent l'intégrité et la faisabilité des solutions. La contrainte (C3) permet de tenir compte de la capacité de ressources de contrôle. Quant à l'approche assurantielle, elle est intégrée grâce à la contrainte (C4) qui va être expliquée plus en détail. Comme les vraies valeurs de MAR vont dépendre des dates d'exécution réelles des contrôles planifiés, la contrainte (C4) se base sur un calcul prévisionnel du MAR (\hat{MAR}) dans le cas où les contrôles sont exécutés exactement aux dates optimales définies par T^* . Ce calcul est basé sur la propriété suivante :

Propriété 1.

Dans le cas où la fonction MAR_z est continue par morceaux sur $]t_k, t_{k+1}] \forall k \in \{0, n_z\}$ avec $t_0 = 0, t_{n_z+1} = H_z$ et $t_k \in]t_{k-1}, H_z[\forall k = 1, \dots, n_z$, la répartition équidistante des dates de contrôle sur l'horizon H_z de l'outil minimise sa valeur maximale du MAR :

$$\min_{T^z} MAR_{(z,max)}^x = \frac{H_z}{n_z + 1} \quad \forall x \in X^{n_z} \quad (3.6)$$

avec

X^{n_z} : ensemble des plans de surveillance contenant n_z contrôles des produits effectués sur l'outil z

$T^z = (t_{(z,1)}, \dots, t_{(z,n_z)})$: Dates des contrôles des produits effectués sur l'outil z

Dans ce cas, les date optimales des contrôles de l'outil z sont définies par T^{z*} comme suit :

$$t_{(z,i)}^* = i \times \frac{H_z}{n_z + 1} \quad \forall i \in \{1, \dots, n_z\} \quad (3.7)$$

Preuve 1. Voir Annexe C

La contrainte (C4) est construite comme suit :

1. Il faut avoir un plan de surveillance x dans lequel tout chaque outil z a un MAR maîtrisé, c'est à dire

$$MAR_{z,max}^x \leq R_L \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.8)$$

2. Nous savons que quel que soit le plan de surveillance x et quelles que soient

les dates de contrôle T^x on a

$$MAR_{z,max}^x \geq \frac{H_z}{n_z + 1} \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.9)$$

alors

$$\min_{T^x} MAR_{z,max}^x = \left\lceil \frac{H_z}{n_z + 1} \right\rceil \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.10)$$

3. Si nous estimons $MAR_{z,max}$ par sa valeur dans le cas où les contrôles sont exécutés aux dates optimales, on a

$$\hat{MAR}_{(z,max)}^x = \left\lceil \frac{H_z}{n_z + 1} \right\rceil \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.11)$$

4. Dans cette logique assurantielle, il faut au moins que l'estimation de $MAR_{z,max}^x$ respecte la contrainte R_L

$$\hat{MAR}_{(z,max)}^x = \left\lceil \frac{H_z}{n_z + 1} \right\rceil \leq R_L \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.12)$$

5. Comme les valeurs exactes de H_z et n_z ne sont pas connues en avance car dépendantes de l'ordonnancement en temps réel de la production, elles sont donc estimés grâce au dispatching prévisionnel $DISP$ comme suit :

$$\hat{H}_z = \sum_{i \in \mathcal{I}} \left\lceil N_i \times DISP_{(i,z)} \right\rceil \quad (3.13)$$

$$\hat{n}_z = \sum_{i \in \mathcal{I}} \left\lfloor n_i \times DISP_{(i,z)} \right\rfloor \quad (3.14)$$

avec

- $\lfloor x \rfloor$: La partie entière du réel x
- $\lceil x \rceil$: La partie entière par excès du réel x
- $\lceil N_i \times DISP_{(i,z)} \rceil$: Le nombre prévisionnel de produits dont l'opération i sera effectuée sur l'outil z .
- $\lfloor n_i \times DISP_{(i,z)} \rfloor$: Le nombre prévisionnel de contrôles imputés à l'outil z parmi n_i contrôles de l'opération i .
- $DISP$: Le dispatching prévisionnel de la charge totale de fabrication sur l'ensemble des outils de fabrication, caractérisé par :

$$0 \leq DISP_{(i,z)} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall z \in \mathcal{Z} \quad (3.15)$$

$$DLSP_{(i,z)} = 0 \quad \forall z \notin \mathcal{Z}^i \quad (3.16)$$

$$\sum_{z \in \mathcal{Z}} DLSP_{(i,z)} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.17)$$

6. La contrainte (C4) est obtenue en substituant les formules de H_z et n_z dans l'inéquation (3.12) par leurs formules des valeurs prévisionnelles \hat{H}_z et \hat{n}_z , respectivement.

Ce problème d'optimisation est analogue au problème de sac-à-dos borné (BKP pour Bounded Knapsack Problem en anglais). le BKP se ramène facilement à un problème de sac-à-dos binaire (0-1KP) qui est un problème NP-difficile dont la résolution exacte n'est pas possible en un temps polynomial [Garey et Johnson, 1979] (voir Tableau 3.4). La complexité du problème PCPS est clairement plus prononcé puisque à chaque niveau de l'arbre de décision correspondant au nombre de contrôles à faire sur l'opération i , le nombre de possibilités à examiner à ce niveau est

$$\prod_{j=1}^{j=i} (1 + N_j) = \prod_{j=1}^{j=i} \left(1 + \sum_{p \in \mathcal{P}^j} Q_p \right) \quad (3.18)$$

En effet, au niveau i de l'arbre de décision, correspondant à la $i^{\text{ème}}$ opération, chaque opération $j \in \{1, \dots, i\}$ possède $(N_j + 1)$ possibilités concernant la décision du nombre de mesure à effectuer : $n_j \in \{0, \dots, N_j\}$.

Remarque 1. Les deux problèmes (0-1KP et PCPS) sont identiques lorsque $Card(\mathcal{I}) = n$ et $Card(\mathcal{P}) = 1$ avec $Q_1 = 1$ ou lorsque $Card(\mathcal{I}) = n$ avec $Card(\mathcal{I}^p) = 1 \quad \forall p$ et $Q_p = 1 \quad \forall p$.

Remarque 2. Dans certains cas spécifiques, un produit p ou une opération i peuvent présenter des contraintes sur le nombre (ou le taux) minimal de contrôles qu'ils doivent subir pour satisfaire une exigence de client ou un besoin d'ingénierie par exemple. Dans ces cas, il est certain que la complexité va être réduite, puisque le nombre de possibilités à examiner dans chaque niveau de l'arbre de décision va être réduit. Par exemple, si chacune des opérations $i \in \mathcal{I}$ doit avoir un nombre minimum de contrôle n_i^{\min} , le nombre de possibilités à examiner au i -ème niveau de l'arbre de décision passe à

$$\prod_{j=1}^{j=i} (N_j - n_j^{\min}) \quad (3.19)$$

Cependant, ce type de contrainte peut rendre la résolution impossible, lorsque la capacité de mesure disponible ne permet pas de satisfaire l'ensemble de ces contraintes.

4 Une heuristique en deux étapes

Nous proposons dans cette section une heuristique en deux étapes qui représente une résolution séquentielle du problème (P) décrit dans la section précédente. La première étape réserve une partie de la capacité de contrôle pour vérifier, si possible, que tous les outils de fabrications ne risquent pas d'avoir un MAR qui dépasse la limite de résilience R_L . Il s'agit de trouver une solution qui minimise les n_i qui vérifie la contrainte (C4). La deuxième étape permet d'optimiser la capacité résiduelle de contrôle afin d'améliorer l'efficacité du plan de surveillance selon la charge de contrôle $CH1$ issue de l'étape 1 (voir Figure 3.3.)

0-1KP	PCPS
Les données	
N : Nombre d'objets à mettre dans le sac W : Poids maximal que peut supporter le sac $p_i \in \mathbb{N}^+ \forall i \in \{1, \dots, N\}$: profit associé à l'objet i $w_i \in \mathbb{N}^+ \forall i \in \{1, \dots, N\}$: poids de l'objet i	I : Nombre d'opérations à contrôler $CAPA$: Capacité totale de contrôle $C_i \in \mathbb{R}^+ \forall i \in \{1, \dots, I\}$: efficacité d'un contrôle effectué sur l'opération i $Ct_i \in \mathbb{N}^+ \forall i \in \{1, \dots, I\}$: temps de contrôle de l'opération i
L'objectif	
Trouver un sous ensemble $X \subset \{1, \dots, N\}$ tel que $\sum_{x \in X} w_x \leq W$ et qui maximise $\sum_{x \in X} p_x$	Trouver l'ensemble $\{n_i\}_{i \in \{1, \dots, I\}}$ tel que $\sum_{i \in \{1, \dots, I\}} n_i \times Ct_i \leq CAPA$ et qui maximise $\sum_{i \in \{1, \dots, I\}} n_i \times C_i$
Les Variables de décision	
$x_i=1$ si l'objet i est pris; 0 sinon $\forall i \in \{1, \dots, N\}$	$0 \leq n_i \leq \sum_{p \in \mathcal{P}^i} Q_p \forall i \in \{1, \dots, I\}$
Arbre de décision/Complexité	

TABLEAU 3.4 – Analogie entre PCPS et 0-1KP

Remarque 3. Théoriquement, l'espace de solutions peut être vide lorsque R_L et CAPA sont relativement petits ou lorsque les contraintes sur les nombres (ou les taux) minimaux de contrôles sont élevées. Si tel est le cas avec une instance donnée, l'heuristique permet quand même d'avoir une solution qui correspond à un plan de surveillance se limitant à la capacité de contrôle disponible et respectant au mieux les contraintes liées à R_L et aux nombres minimaux de contrôle.

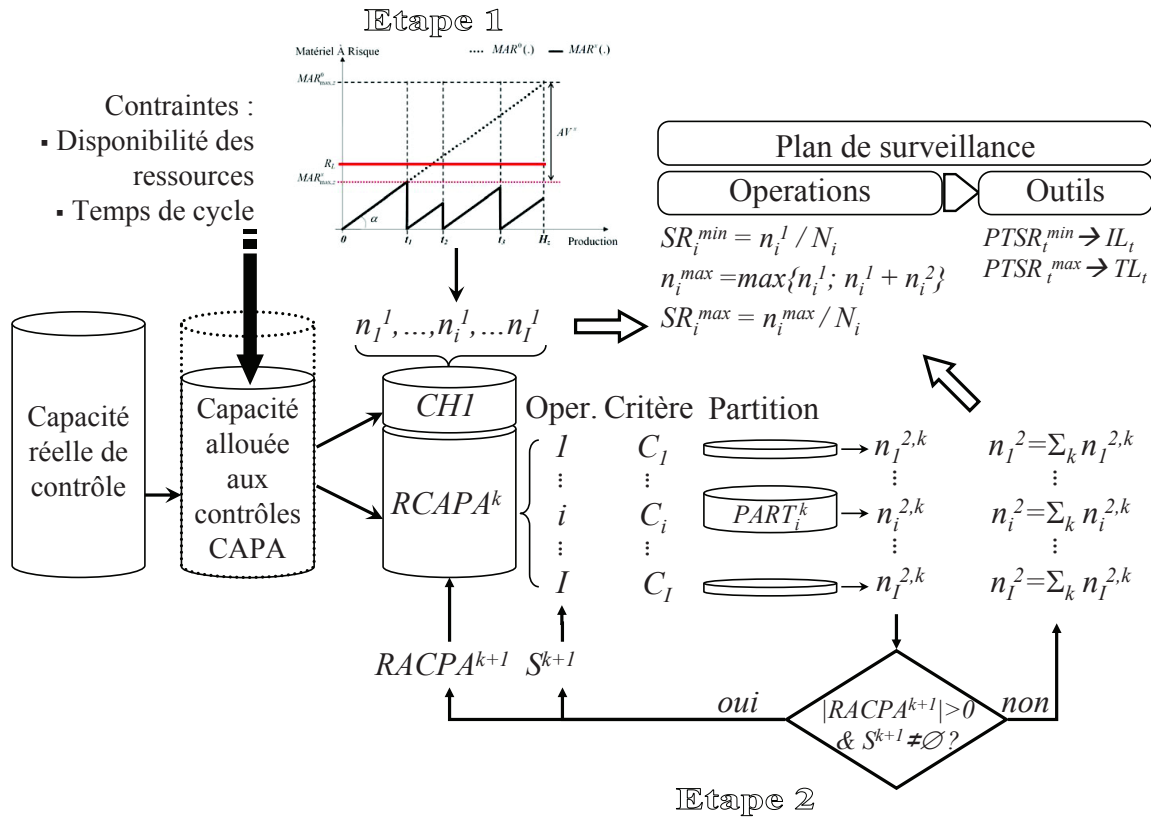


FIGURE 3.3 – Approche en deux étapes

4.1 Étape 1 : Plan de surveillance minimal basé sur la limite R_L

Cette étape consiste à déterminer un nombre minimal de contrôle n_i^1 de chacune des opérations qui permette de satisfaire la contrainte (C4). Pour cela, il suffit d'échantillonner chaque opération avec un taux égal au plus grand parmi les taux d'échantillonnage minimaux des outils qualifiés pour l'exécuter, c'est à dire

$$\frac{n_i}{N_i} \geq \max_{z \in \mathcal{Z}^i} \frac{\hat{n}_z}{\hat{H}_z} = \frac{1}{R_L} - \frac{1}{\max_{z \in \mathcal{Z}^i} \hat{H}_z} \quad (3.20)$$

Ce qui signifie que n_i doit vérifier

$$n_i \geq \frac{N_i}{R_L} - \frac{N_i}{\max_{z \in \mathcal{Z}^i} \hat{H}_z} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.21)$$

d'où l'expression de n_i^1

$$n_i^1 = \left\lceil N_i \times \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\max_{z \in \mathcal{Z}^i} \hat{H}_z} \right) \right\rceil \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.22)$$

Le plan de surveillance minimal est constitué de n^1 contrôles répartis sur l'ensemble des outils de fabrication proportionnellement au dispatching prévisionnel $DISP$:

$$n^1 = \sum_{i \in \mathcal{I}} n_i^1 \quad (3.23)$$

Ce plan minimal correspond à la charge de contrôle suivante :

$$CH1 = \sum_{i \in \mathcal{I}} n_i^1 \times Ct_i \quad (3.24)$$

Ct_i étant le temps de mesure de l'opération i .

4.2 Etape 2 : Ajustement de plan de surveillance minimal pour optimiser la capacité et l'efficacité

Cette étape permet d'ajuster le plan de surveillance calculé à l'étape 1 en fonction de la capacité de contrôle disponible. Cette capacité noté $CAPA$ est exprimée en unité de temps.

En effet, le plan de contrôle minimal calculé à l'étape 1 correspond à une charge de contrôle notée $CH1$ utilisée pour maîtriser le niveau de MAR de l'ensemble des outils de fabrication. Selon les valeurs de $CAPA$ et $CH1$ trois cas distinctes sont à traiter dans cette étape : $CAPA = CH1$, $CAPA > CH1$ et $CAPA < CH1$.

4.2.1 Cas 1 : $CAPA = CH1$

La capacité disponible correspond exactement à la charge nécessaire à l'étape 1. Dans ce cas l'étape 2 ne sera pas effectuée et le plan de contrôle final est celui calculé à l'étape 1. Il est à noter que dans ce cas aucune marge de flexibilité sur le

nombre de contrôles à effectuer n'est permise. Par contre, une marge de flexibilité sur les dates des contrôles (le choix des produits à échantillonner) peut exister pour certains outils dans le cas où H_z n'est pas un multiple de R_L . Soit $k_z \in \{1, \dots, n_z\}$ l'indice de l'échantillon prélevé sur l'outil z et $t_{k_z} \in [1, H_z]$, avec $t_{k_z} > t_{k_z-1} \quad \forall k_z \in \{2, \dots, n_z\}$, l'indice du produit correspondant au $k_z^{\text{ème}}$ échantillon prélevé sur l'outil z . Pour garantir que R_L ne soit pas dépassé, les marges d'échantillonnage sont définie par :

$$\max \{t_{k_z-1} + 1; H_z - (n_z - k_z + 1) \times R_L\} \leq t_{k_z} \leq \min \{H_z; t_{k_z-1} + R_L\} \quad (3.25)$$

La Figure 3.4 illustre ce propos avec $n_z^1 = 2$

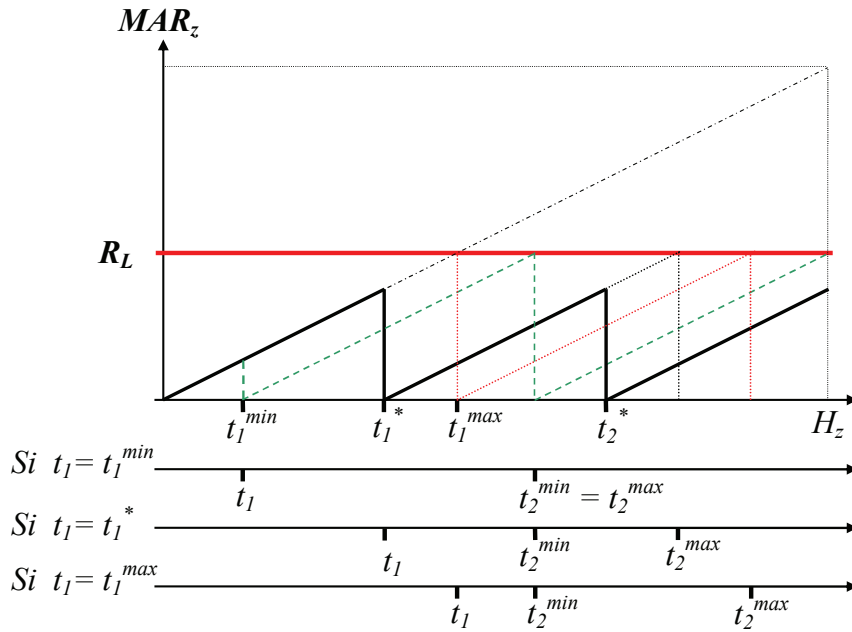


FIGURE 3.4 – Illustration des tolérances d'échantillonnage

4.2.2 Cas 2 : $CAPA > CH1$

La capacité résiduelle $RCAPA = CAPA - CH1$ est distribuée pour le contrôle de différentes opérations en utilisant un algorithme glouton (Algorithme 4.2.3). La partition de $RCAPA$ se fait sur plusieurs itérations selon le critère d'efficacité de contrôles noté C_i . À Chaque itération k la capacité résiduelle $RCAPA^k$ est répartie sur l'ensemble des opérations candidates S^k comme suit :

1. Calcul de la partition

$$PART_i^k = |RCAPA^k| \times \frac{C_i \times N_i}{\sum_{j \in \mathcal{S}^k} C_j \times N_j} \quad (3.26)$$

2. Calcul du nombre de contrôles complémentaires

$$n_i^{2,k} = \min \left\{ \left\lfloor PART_i^k / Ct_i \right\rfloor ; N_i - n_i^1 - \sum_{k'=1}^{k-1} n_i^{2,k'} \right\} \quad (3.27)$$

 3. Mise à jour de $RCAPA^k$ et \mathcal{S}^k

$$RCAPA^{k+1} = RCAPA^k - \sum_{i=1}^I n_i^{2,k} \quad (3.28)$$

$$\mathcal{S}^{k+1} = \begin{cases} \mathcal{S}^k - \mathcal{S}^{\mathcal{S}^k} & \text{si } \mathcal{S}^{\mathcal{S}^k} \neq \emptyset \\ \mathcal{S}^k - \arg \min_{i \in \mathcal{S}^k} C_i & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.29)$$

Avec

$$\mathcal{S}^{\mathcal{S}^k} = \left\{ i \in \mathcal{S}^k \mid \sum_{k'=1}^k n_i^{2,k'} = N_i - n_i^1 \right\} \quad (3.30)$$

A la fin de l'étape 2, le nombre de contrôles pour chacune des opérations dans le plan de surveillance final est

$$n_i = n_i^1 + n_i^2 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.31)$$

où n_i^2 est le nombre de contrôles complémentaires déterminé à l'étape 2 qui est caractérisé par

$$0 \leq n_i^2 \leq N_i - n_i^1 \quad (3.32)$$

$$n_i^2 = \sum_{k=1}^K n_i^{2,k} \quad (3.33)$$

Avec K le nombre total d'itérations à la fin de l'étape 2 et $n_i^{2,k}$ le nombre de contrôles ajoutés à l'opération i à l'itération k qui est caractérisé par

$$0 \leq n_i^{2,k} \leq N_i - n_i^1 - \sum_{k'=1}^{k-1} n_i^{2,k'} \quad (3.34)$$

A la fin de cette étape, la charge de l'étape 2 $CH2$ et le taux de charge global (en pourcentage) $TCH(\%)$ du plan de surveillance peuvent être calculés comme suit :

$$CH2 = \sum_{i \in \mathcal{I}} n_i^2 \times Ct_i \quad (3.35)$$

$$TCH(\%) = 100 \times \frac{CH1 + CH2}{CAPA} = 100 \times \frac{\sum_{i \in \mathcal{I}} (n_i^1 + n_i^2) \times Ct_i}{CAPA} \quad (3.36)$$

4.2.3 Cas 3 : $CAPA < CH1$

Ce cas se présente lorsque l'étape 1 aboutit à une surcharge des outils de contrôle $SURCH = CH1 - CAPA$. L'étape 2 va donc consister à enlever l'équivalent de cette surcharge en réduisant judicieusement le nombre de contrôles calculé à l'étape 1 pour certaines opérations. Le choix des opérations dont le nombre de contrôles sera réduit est effectué de façon à minimiser la perte d'efficacité de plan de surveillance initial.

L'algorithme de répartition est identique à celui du cas 2 (Algorithme 4.2.3) avec les modifications suivantes :

Ligne N°2 : Le nombre de contrôles à supprimer dans le plan de surveillance initial doit être équivalent supérieur ou égal à la surcharge :

Tant que $(RCAPA^k < 0 \text{ et } S^k \neq \emptyset)$ **faire**

Ligne N°7 : Comme il faut supprimer des contrôles sur certaines opérations, on favorise la suppression des contrôles les plus inefficaces :

$$PART_i^k \leftarrow RCAPA^{k-1} \times \frac{C_i^{-1} \times N_i}{\sum_{j \in S^{k-1}} C_j^{-1} \times N_j}$$

Ligne N°10 : Comme S^k dans ce cas contient la liste des opérations dont le nombre de contrôle sera diminué, on choisi d'éliminer de cette liste l'opération dont le contrôle est le moins inefficace (le plus efficace) ce qui signifie que le nombre de contrôle de cette opération ne sera plus diminué aux prochaines itérations :

$$S^k \leftarrow S^{k-1} - \arg \min_{j \in S^{k-1}} C_j^{-1}$$

Ligne N°11 : Vérifier si, à une itération donnée, le part de charge de contrôle à supprimer sur une opération aboutit ou pas à un nombre cumulé de contrôles

à supprimer supérieur au nombre de contrôles planifiés à l'étape 1 :

$$\text{Si } \left(\sum_{k'=1}^k n_i^{2,k'} < -n_i^1 \right) \text{ alors}$$

Ligne N°12 : Se limiter à la suppression des contrôles planifiés à l'étape 1, lorsque la condition de ligne N°11 est vérifiée :

$$n_i^{2,k} = - \left(n_i^1 + \sum_{k'=1}^{k-1} n_i^{2,k'} \right)$$

4.3 Exemple illustratif

4.3.1 L'instance

L'exemple que nous traitons pour illustrer la méthode proposée concerne la surveillance d'un seul mode de défaillance qui risque d'affecter la gamme de production de trois produits (P1, P2 et P3). Le modèle de flux est constitué de quatre opérations de processus ($OP1, \dots, OP4$). Chacune des ces opérations peut être contrôlée immédiatement après son exécution sur l'un des trois outils $T1$ à $T3$. Nous supposons dans cet exemple que les aptitudes de fabrication et de mesure et les temps de mesure sont constantes (voir Tableau 4.3.1). Les outils de mesure sont aussi supposés identiques et ayant une capacité totale de mesure $CAPA = 70$. Le plan de surveillance à déterminer doit tenir compte de la limite de résilience $R_L = 7$.

Dans cet exemple, nous supposons que le dispatching prévisionnel $DISP$ est caractérisé par :

$$DISP_{(i,z)} = \frac{1}{Card(\mathcal{Z}^i)} \quad \forall i \in \mathcal{I}, z \in \mathcal{Z} \quad (3.37)$$

Avec

$Card(\mathcal{Z}^i)$: le nombre d'outils qualifiés pour l'exécution de l'opération i

4.3.2 Étape 1 : calcul du plan minimal

– Calcul des horizons des outils

$$\hat{H}_z = \sum_{\substack{i=OP1, \dots, OP4 \\ \mathcal{Z}^i \supset z}} \frac{N_i}{Card(\mathcal{Z}^i)} \quad \forall z \in \{T1, T2, T3\}$$

$$\hat{H}_{T1} = \frac{36}{2} + \frac{10}{3} = \frac{64}{3}$$

$$\hat{H}_{T_2} = \frac{27}{1} + \frac{10}{3} + \frac{26}{2} = \frac{130}{3}$$

$$\hat{H}_{T_3} = \frac{36}{2} + \frac{10}{3} + \frac{26}{2} = \frac{103}{3}$$

Début

1. $k = 0; \mathcal{S}^k \leftarrow \mathcal{I}; RCAPA^k \leftarrow CAPA - CH1;$
 2. **Tant que** ($RCAPA^k > 0$ **et** $\mathcal{S}^k \neq \emptyset$) **faire**
 3. $k \leftarrow k + 1;$
 4. **Pour** ($i = 1$ **jusqu'à** $i = I$) **faire**
 5. $PART_i^k \leftarrow 0;$
 6. **Si** ($i \in \mathcal{S}^{k-1}$) **alors**
 7. $PART_i^k \leftarrow RCAPA^{k-1} \times \frac{C_i \times N_i}{\sum_{j \in \mathcal{S}^{k-1}} C_j \times N_j};$
 8. **Fin si**
 9. $n_i^{2,k} = \lfloor PART_i^k / Ct_i \rfloor;$
 10. $\mathcal{S}^k \leftarrow \mathcal{S}^{k-1} - \arg \min_{j \in \mathcal{S}^{k-1}} C_j;$
 11. **Si** $\left(\sum_{k'=1}^k n_i^{2,k'} > N_i - n_i^1 \right)$ **alors**
 12. $n_i^{2,k} = N_i - \left(n_i^1 + \sum_{k'=1}^{k-1} n_i^{2,k'} \right);$
 13. $\mathcal{S}^k \leftarrow \mathcal{S}^{k-1} - \{i\};$
 14. **Fin si**
 15. $RCAPA^k \leftarrow RCAPA^{k-1} - n_i^{2,k} \times Ct_i;$
 16. **Fin Pour**
 17. **Fin Tant que**
 18. **Pour** ($i = 1$ **jusqu'à** $i = I$) **faire**
 19. $n_i^2 = \sum_{j=1}^k n_i^{2,j};$
 20. **Fin Pour**
- Fin**
-

Algorithme 1: Un algorithme glouton pour l'étape 2 de l'heuristique (Cas 2 : $CAPA > CH1$)

Quantité(Q_p)	Produit(p)	Les opérations (i)			
		OP1	OP2	OP3	OP4
10	P1	×	×	×	
9	P2		×		×
17	P3	×	×		×
outils qualifiés	T1		×	×	
	T2	×		×	×
	T3		×	×	×
Temps de mesure	Ct_i	5	3	2	4
Aptitude de fabrication	CP_i	1	3	0,5	7
Aptitude de mesure	CPM_i	5	1	4	0,5

TABEAU 3.5 – Instance de l'exemple illustratif

- Calcul des nombres de contrôles nécessaires pour chaque outil

$$n_z^1 = \left\lceil \frac{\hat{H}_z}{R_L} - 1 \right\rceil \quad \forall z \in \{T1, T2, T3\}$$

$$n_{T1}^1 = \left\lceil \frac{64}{3 \times 7} - 1 \right\rceil = 3$$

$$n_{T2}^1 = \left\lceil \frac{130}{3 \times 7} - 1 \right\rceil = 6$$

$$n_{T3}^1 = \left\lceil \frac{103}{3 \times 7} - 1 \right\rceil = 4$$

- Calcul des nombres de contrôles nécessaires pour chaque opération

$$n_i^1 = \left\lceil N_i \times \max_{z \in \mathcal{Z}^i} \frac{n_z}{\hat{H}_z} \right\rceil = \left\lceil N_i \times \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\max_{z \in \mathcal{Z}^i} \hat{H}_z} \right) \right\rceil \quad \forall i = \{OP1, \dots, OP4\}$$

$$n_{OP1}^1 = \left\lceil N_{OP1} \times \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\hat{H}_{T2}} \right) \right\rceil = \left\lceil 27 \times \left(\frac{1}{7} - \frac{3}{130} \right) \right\rceil = \lceil 3,23 \rceil = 4$$

$$n_{OP2}^1 = \left\lceil N_{OP2} \times \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\max_{z \in \{T1, T3\}} \hat{H}_z} \right) \right\rceil = \left\lceil 36 \times \left(\frac{1}{7} - \frac{3}{103} \right) \right\rceil = \lceil 4,09 \rceil = 5$$

$$n_{OP3}^1 = \left\lceil N_{OP3} \times \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\max_{z \in \{T1, T2, T3\}} \hat{H}_z} \right) \right\rceil = \left\lceil 10 \times \left(\frac{1}{7} - \frac{3}{130} \right) \right\rceil = \lceil 1, 19 \rceil = 2$$

$$n_{OP4}^1 = \left\lceil N_{OP4} \times \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\max_{z \in \{T2, T3\}} \hat{H}_z} \right) \right\rceil = \left\lceil 26 \times \left(\frac{1}{7} - \frac{3}{130} \right) \right\rceil = \lceil 3, 11 \rceil = 4$$

– calcul de la charge de l'étape 1

$$CH^1 = \sum_{i=OP1, \dots, OP4} n_i^1 \times Ct_i = 55$$

	OP1	OP2	OP3	OP4
n_i^1	4	5	2	4

TABLEAU 3.6 – Résultats de l'étape 1

4.3.3 Étape 2 : Optimisation de la capacité résiduelle

– Initialisation

$$\mathcal{S}^0 = \{OP1, OP2, OP3, OP4\}; RCAPA^0 = CAPA - CH^1 = 70 - 55 = 15$$

– Itération 1 ($k = 1$) : La répartition de la capacité résiduelle $RCAPA^0$ et le nombre de contrôles supplémentaires à chacune des opérations appartenant à \mathcal{S}^0 sont présentés dans Tableau 3.7.

	OP1	OP2	OP3	OP4
\mathcal{S}^0	×	×	×	×
$PART_i^1$	8,84	0,78	5,24	0,17
$n_i^{2,1}$	1	0	2	0

TABLEAU 3.7 – Résultats de l'étape 2 à l'itération 1

L'opération à ne plus considérer aux prochaines opération est $OP4 = \arg \min_{j \in \mathcal{S}^0} C_j$

La mise à jour de l'ensemble des opérations candidates et la capacité résiduelle pour l'itération suivante :

$$\mathcal{S}^1 = \{OP1, OP2, OP3\}; RCAPA^1 = RCAPA^0 - (1 \times 5 + 2 \times 2) = 15 - 9 = 6$$

- itération 2 : La répartition de la capacité résiduelle $RCAPA^1$ et le nombre de contrôles supplémentaire à chacune des opérations appartenant à \mathcal{S}^1 sont présentés dans Tableau 3.8.

	$OP1$	$OP2$	$OP3$	$OP4$
\mathcal{S}^1	×	×	×	–
$PART_i^2$	3,56	0,32	2,12	–
$n_i^{2,2}$	0	0	1	–

TABLEAU 3.8 – Résultats de l'étape 2 à l'itération 2

L'opération à ne plus considérer aux prochaines itérations est $OP2 = \arg \min_{j \in \mathcal{S}^1} C_j$

La mise à jour de l'ensemble des opérations candidates et la capacité résiduelle pour l'itération suivante :

$$\mathcal{S}^2 = \{OP1, OP3\}; RCAPA^2 = RCAPA^1 - 1 \times 2 = 6 - 2 = 4$$

- itération 3 : La répartition de la capacité résiduelle $RCAPA^2$ et le nombre de contrôles supplémentaire à chacune des opérations appartenant à \mathcal{S}^1 sont présentés dans Tableau 3.9.

	$OP1$	$OP2$	$OP3$	$OP4$
\mathcal{S}^2	×	–	×	–
$PART_i^3$	2,51	–	1,49	–
$n_i^{2,3}$	0	–	0	–

TABLEAU 3.9 – Résultats de l'étape 2 à l'itération 3

L'opération à ne plus considérer aux prochaines itérations est $OP1 = \arg \min_{j \in \mathcal{S}^2} C_j$

La mise à jour de l'ensemble des opérations candidates et la capacité résiduelle pour l'itération suivante :

$$\mathcal{S}^3 = \{OP3\}; RCAPA^3 = RCAPA^2 - 0 = 4$$

- itération 4 : La répartition de la capacité résiduelle $RCAPA^3$ et le nombre de contrôles supplémentaire à chacune des opérations appartenant à \mathcal{S}^1 sont présentés dans Tableau 3.10.

L'opération à ne plus considérer aux prochaines itérations est $OP3 = \arg \min_{j \in \mathcal{S}^3} C_j$

La mise à jour de l'ensemble des opérations candidates et la capacité résiduelle pour l'itération suivante :

$$\mathcal{S}^4 = \emptyset; RCAPA^4 = RCAPA^3 - (2 \times 2) = 0$$

	OP1	OP2	OP3	OP4
\mathcal{S}^2	-	-	\times	-
$PARI_i^4$	-	-	4	-
$n_i^{2,4}$	-	-	2	-

TABLEAU 3.10 – Résultats de l'étape 2 à l'itération 4

- Sortie de la boucle Tant que
- Calcul des résultats de l'étape 2 : Le récapitulatif des itérations et des nombres de contrôles supplémentaires correspondants est présenté dans Tableau 3.11

	OP1	OP2	OP3	OP4
$n_i^{2,1}$	1	0	2	0
$n_i^{2,2}$	0	0	1	-
$n_i^{2,3}$	0	-	0	-
$n_i^{2,4}$	-	-	2	-
n_i^2	1	0	5	0

TABLEAU 3.11 – Résultats de à la fin de l'étape 2

4.3.4 Résultat final de l'heuristique

Le résultat final de l'heuristique (Tableau 3.12), qui définit le nombre de contrôle pour chaque opération de fabrication, permet de construire le plan de surveillance assurantiel. Le niveau de MAR que peut assurer ce plan de surveillance (noté HA) pour chacun des outils de fabrication peut être estimé en utilisant la formule (3.12) avec les valeurs estimées de H_z et n_z .

$$\hat{MAR}_{z,max}^{HA} = \left\lceil \frac{\hat{H}_z}{\hat{n}_z + 1} \right\rceil \quad \forall z \in \{T1, T2, T3\}$$

4.3.5 Comparaison avec la solution optimale

Pour tester la performance de l'heuristique sur cet exemple illustratif, nous avons pu comparer la solution de l'heuristique HA avec la solution optimale OA . Cette

dernière est obtenue avec le solveur *IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio* en utilisant la formalisation décrite dans la section précédente. Le tableau 3.13 présente un comparatif des résultats de l'heuristique par rapport à la solution optimale en terme d'efficacité globale du plan de surveillance et des valeurs maximales de MAR estimées par outil de fabrication. Nous constatons que le plan de surveillance de solution de l'heuristique est à moins de 4% de l'optimal d'un point de vue efficacité. D'autre part, d'un point de vue maîtrise du MAR la solution optimale permet de réduire mieux l'exposition au risque de l'outil $T3$.

5 Analyses des effets des paramètres R_L et $CAPA$

Cette section vise à analyser l'effet de deux paramètres importants dans cette approche de conception de plan de surveillance. Pour cela, des expérimentations faisant varier les paramètres R_L et $CAPA$ ont été menées en utilisant l'instance du Tableau 3.14. Il s'agit d'un plan de production d'une semaine de trois produits $P1$, $P2$ et $P3$ avec les quantités 1000, 800 et 1200 respectivement. Le modèle de flux de processus est constitué de 17 opérations dont chacune peut être contrôlée immédiatement après son exécution suivant le plan de surveillance à définir. Trois outils de fabrication sont disponibles pour exécuter ces opérations ($T1$, $T2$ et $T3$). Comme les différents produits peuvent avoir différentes spécifications pour la même opération, le même outil exécutant la même opération peut avoir un indice de capacité différent selon le produit fabriqué. Par exemple, l'outil $T2$ est plus capable d'exécuter l'opération 5 sur un exemplaire du produit C que sur un exemplaire du produit A . Un seul outil de mesure est utilisé (Tm) qui lui aussi peut avoir un indice de capacité de mesure différent d'un produit à un autre pour la même opération.

	$OP1$	$OP2$	$OP3$	$OP4$
n_i^1	4	5	2	4
n_i^2	1	0	5	0
n_i	5	5	7	4
C_i	5	1/3	8	1/14
$\sum n_i \times C_i$	$5 \times 5 + 5/3 + 8 \times 7 + 4/14 \approx 83$			

TABLEAU 3.12 – Récapitulatif et résultat final de l'heuristique

	n_1	n_2	n_3	n_4	$\hat{MAR}_{max,T1}$	$\hat{MAR}_{max,T2}$	$\hat{MAR}_{max,T3}$	$\sum_{i=1,\dots,4} n_i \times C_i$
HA	5	5	7	4	4	5	5	82,95
OA	4	6	8	4	4	5	4	86,26

TABLEAU 3.13 – Comparaison de la solution heuristique (HA) avec la solution optimale (OA)

Dans ces expérimentations, l'observation porte particulièrement sur les taux d'échantillonnage des opérations : $TE_i = n_i/N_i$. Il paraît logique que des taux élevés permettent de limiter l'exposition au risque en termes de nombre de produits potentiellement perdus au cours des périodes non contrôlées de temps de production.

Pour pouvoir faire ses analyses les expérimentations ont été effectuées en faisant varier R_L entre 1 et 1000 et en faisant varier la capacité de mesure utilisée entre 10% et 100% de la capacité réelle. Une variante de l'heuristique sans l'étape 1 est aussi expérimentée pour les différentes valeurs de capacité. Cette variante permet de comparer et de discuter l'apport d'une approche assurantielle par rapport à une approche qui fait juste la maximisation de l'efficacité de plan de surveillance.

Les figures 3.5 et 3.6 présentent l'évolution de certaines caractéristiques globales de plan de surveillance en fonction de $R_L \in \{1, \dots, 1000\}$. Ces caractéristiques sont le nombre total de contrôles, le taux d'échantillonnage moyen de toutes les opérations ($TEM/OPER$), les taux d'échantillonnage moyen par opération d'un point de vue produit ($TEM/OPER(A)$, $TEM/OPER(B)$ et $TEM/OPER(C)$) et d'un point de vue outil de fabrication ($TEM/OPER(T1)$, $TEM/OPER(T2)$ et $TEM/OPER(T3)$).

La première observation sur ces graphiques est la sensibilité de ces caractéristiques face à des valeurs faibles de R_L . C'est à partir de certaines valeurs de R_L que ces caractéristiques tendent à converger vers les valeurs asymptotiques correspondant au cas sans étape 1. En effet, quand R_L devient très grand, la charge de contrôle issue de l'étape 1 devient très faible et la majorité de la capacité disponible est utilisée dans l'étape 2. Alors les courbes tendent vers les mêmes valeurs que dans le cas sans l'étape 1 ($R_L = 0$).

L'influence de capacité de contrôle (%CAPA) et de la limite d'exposition R_L est analysée en utilisant les résultats de la Figure 3.7 qui présente les variations des taux d'échantillonnage en fonction de ces deux paramètres du point de vue pro-

	Produits			Outils			CP							CPM		
$Q_p(10^2)$	10	8	12	3	9	2	T1			T2			T3	Tm		
$i p$	A	B	C	T1	T2	T3	A	B	C	A	B	C	C	A	B	C
1	-	-	×	-	-	×	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-	6,7
2	-	-	×	-	-	×	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-	6,7
3	-	-	×	-	-	×	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-	6,7
4	×	×	×	-	×	×	-	-	-	3,3	3,3	-	2,5	10	10	6,7
5	×	-	×	-	×	-	-	-	-	1,7	-	2,7	-	5	-	8
6	-	-	×	-	×	-	-	-	-	-	-	3,3	-	-	-	10
7	-	-	×	-	×	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	12
8	×	-	×	-	×	-	-	-	-	7,3	-	7,3	-	8	-	8
9	×	×	×	-	×	-	-	-	-	0,6	1,2	0,6	-	2	4	2
10	×	×	×	-	×	-	-	-	-	1,2	1,2	1,2	-	4	4	4
11	×	×	×	×	-	-	2	2	2	-	-	-	-	4	4	4
12	×	×	×	-	×	-	-	-	-	1,5	1,5	1,5	-	5	5	5
13	×	×	×	×	-	-	2,5	2,5	2,5	-	-	-	-	5	5	5
14	×	×	×	-	×	-	-	-	-	1,8	1,8	1,8	-	6	6	6
15	×	×	×	×	-	-	3	3	3	-	-	-	-	6	6	6
16	×	-	×	-	×	-	-	-	-	1,8	-	1,8	-	6	-	6
17	×	-	×	×	-	-	3	-	3	-	-	-	-	5	-	5

TABLEAU 3.14 – Instance de l’analyse des effets des paramètres R_L et $CAPA$

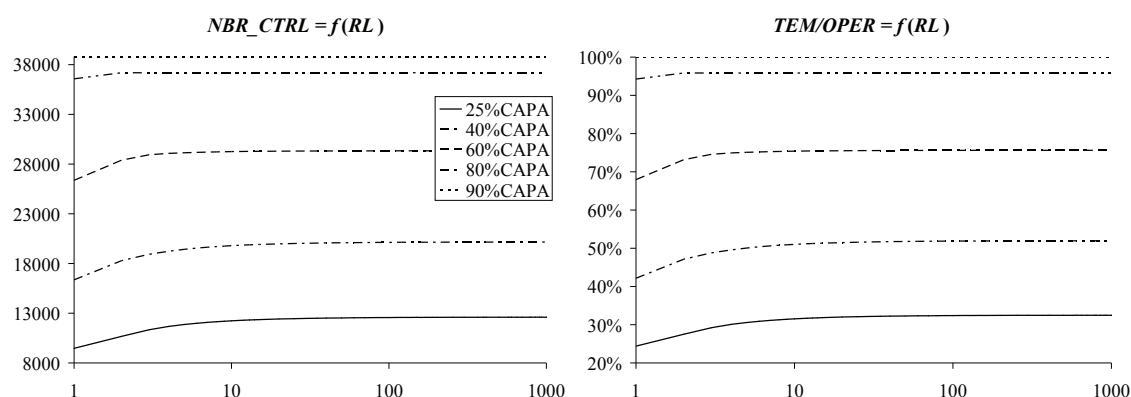
duit et du point de vie outils de fabrication. Pour des valeurs assez élevées de $\%CAPA$ traduisant des grandes capacités de contrôle, la valeur de R_L n’a pratiquement pas d’intérêt dans la conception de plan de surveillance.

Pour des valeurs faibles de $\%CAPA$, le paramètre R_L devient déterminant et n’a pas le même effet d’un produit à un autre ou d’un outil à un autre. Par exemple, dans Tableau 3.15 lorsque la capacité disponible est de 10% et $R_L = 5$ (qui signifie une faible capacité de contrôle avec une exigence forte en terme d’exposition au risque), la politique de contrôle favorise le contrôle du produit C ($TEM/OPER = 13,1\%$), puis le produit B ($TEM/OPER = 9,5\%$) et enfin le produit A ($TEM/OPER = 8,3\%$). Cette hiérarchie entre les produits n’est pas la même lorsque $R_L = 20$ et devient B ($TEM/OPER = 14,7\%$), puis A ($TEM/OPER = 14,5\%$), ensuite C ($SR = 10,7\%$). Le même phénomène peut être observé du point de vue outils de fabrication.

TEM/OPER	Point de vue produit			Point de vue outil		
	A	B	C	T1	T2	T3
Sans Etape1	16,2%	16,8%	9,9%	9,8%	15,2%	10,1%
RL=5	8,3%	9,5%	13,1%	8,1%	11,9%	13,5%
RL=20	14,5%	14,7%	10,7%	10,6%	13,8%	10,9%

TABLEAU 3.15 – Effet de l’approche assurantielle lorsque la capacité de contrôle est faible (30%CAPA)

L’importance de l’utilisation de l’approche assurantielle réside dans son pouvoir de maîtriser l’exposition au risque par la limitation du MAR. La figure 3.8 montre une estimation de l’évolution de MAR_{max} des trois outils de fabrication que peut garantir le plan de surveillance calculé avec l’approche assurantielle lorsque la capacité de contrôle est de 30% de la capacité réelle (nominale). En effet, sans l’approche assurantielle (valeurs correspondants à $R_L = 0$), les valeurs de MAR prévisionnel de trois outils $T1$ $T2$ et $T3$ sont respectivement 11, 7 et 10. A partir de ces courbes on peut déterminer la valeur limite de R_L que la capacité de contrôle disponible permet de respecter en ayant un MAR inférieur à R_L sur tous les outils de fabrication. Dans cet exemple, cette valeur limite de R_L est égale à 9. C’est à dire que tout plan de surveillance calculé avec $R_L \geq 9$ aboutit à des MAR toujours inférieurs à R_L pour tous les outils de fabrication. Cependant, si $9 \leq R_L < 30$ la dominance du plan de surveillance prenant en considération R_L par rapport au plan de surveillance sans étape 1 n’est pas garantie. La dominance du plan de surveillance avec étape 1 est garantie à partir de $R_L = 30$ car tous les

FIGURE 3.5 – Évolution du nombre total des contrôles et du taux d’échantillonnage moyen par opération en fonction de R_L pour différentes valeurs de %CAPA

outils de fabrication ont dans ce cas un MAR inférieur ou égal à sa valeur dans le cas sans l'étape 1.

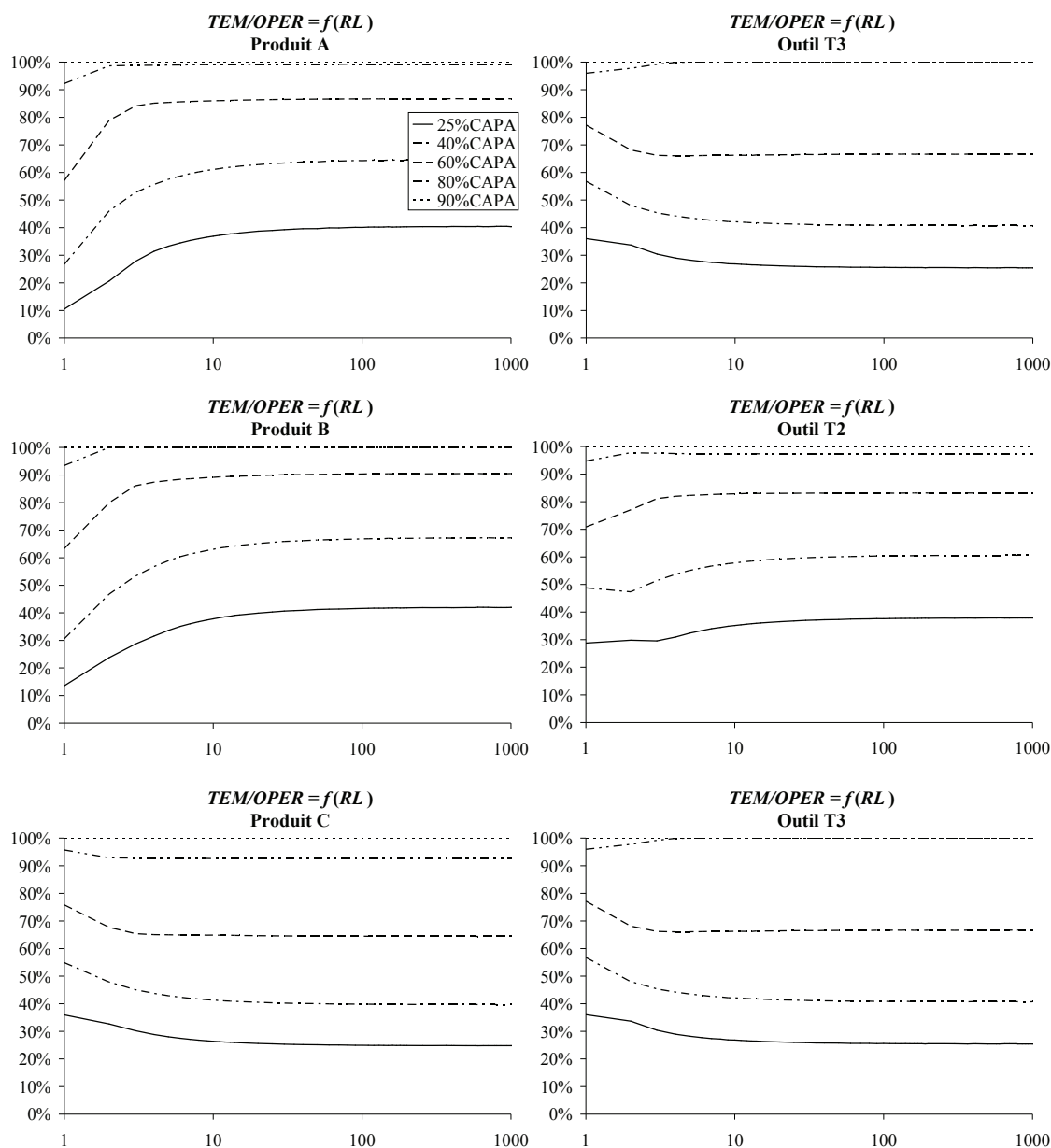


FIGURE 3.6 – Évolution des taux d'échantillonnage moyens par opération en fonction de R_L du point de vue produit et du point de vue outil pour différentes valeurs de $\%CAPA$

6 Le contrôle opérationnel du MAR

Avec une approche assurantielle basée sur le contrôle du MAR, il est nécessaire d'avoir une mesure à jour du nombre de produits qui sont passés par chacun des outils de fabrication. Des décisions opérationnelles basées sur le MAR peuvent être mises en place pour la gestion en temps réel des activités de production et de contrôle de processus. Ces décisions concernent, par exemple, l'arrêt d'un outil de fabrication si son MAR dépasse une limite spécifique, l'ordonnancement des produits dans les files d'attente de mesure selon l'état actuel de MAR des outils

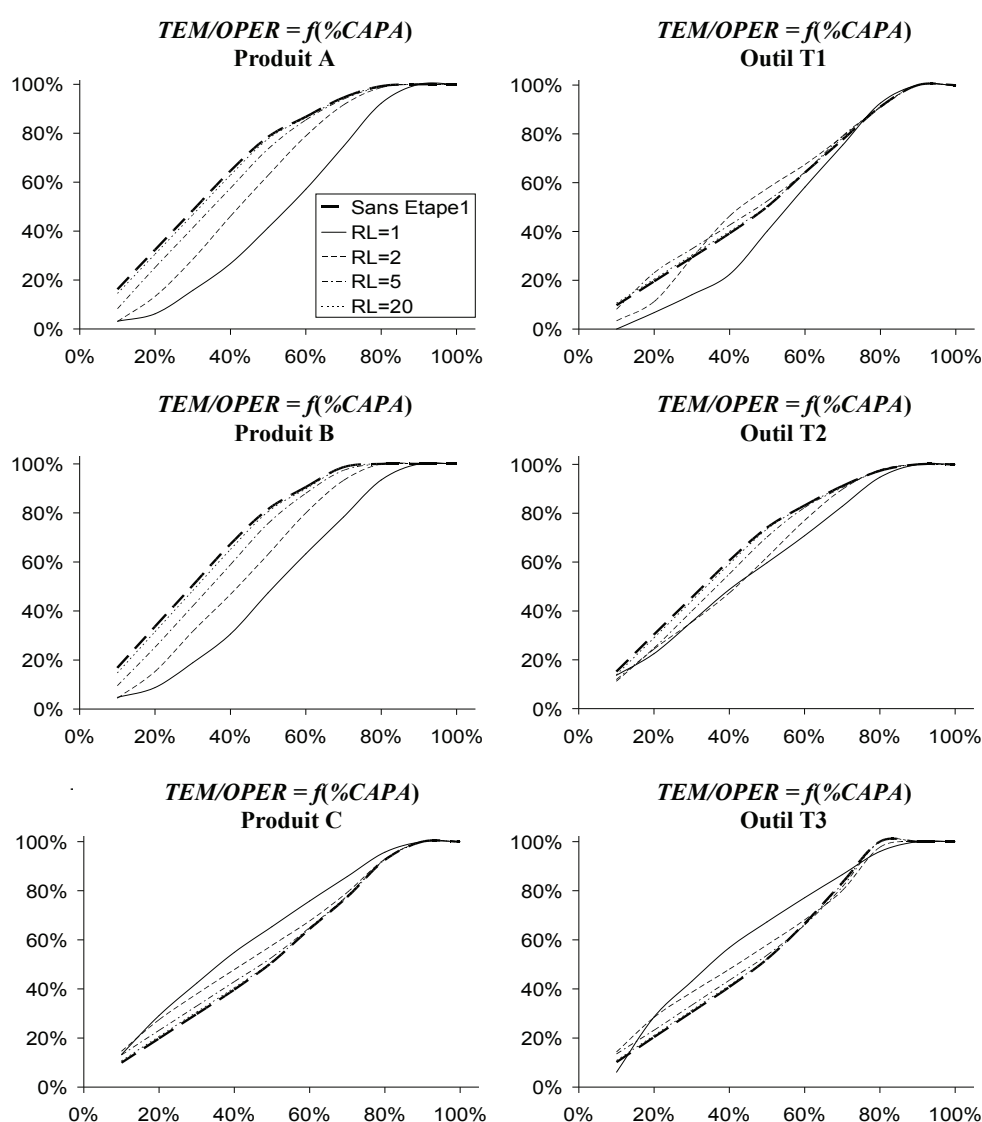
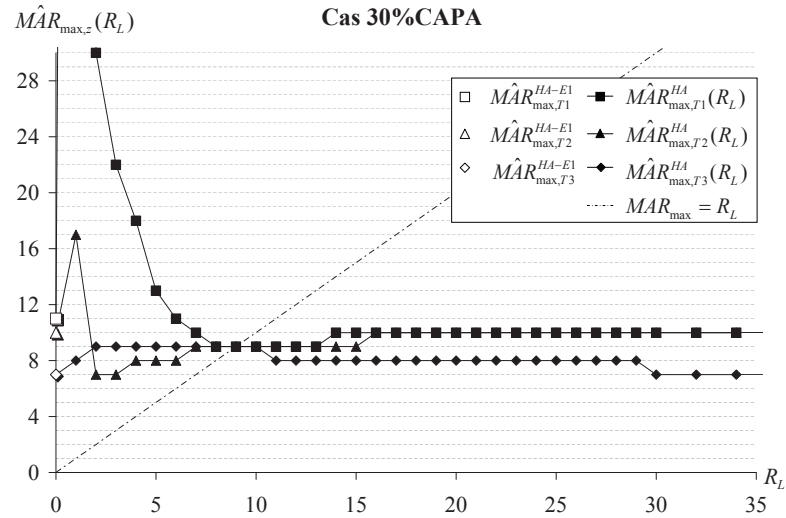


FIGURE 3.7 – Effets de $\%CAPA$ sans et avec politique assurantielle

FIGURE 3.8 – MAR_{max} estimé en fonction de R_L avec 30%CAPA

qui ont traité ces produits, échantillonner un produit à mesurer sur un outil dont le MAR est devenu critique, etc. Définissons les paramètres de contrôle de MAR suivants :

Le seuil cible (TL_z) : C'est la valeur idéale du nombre de produits fabriqués entre deux contrôles successifs de l'outil z . Il correspond à la répartition optimale la capacité de mesure pour contrôler le MAR sur l'ensemble des outils de fabrication sur l'horizon considéré de planification.

Le seuil d'alerte (WL_z) : Ce seuil est utile lorsqu'un délai existe entre les outils de fabrication et les outils de mesure. Il peut être utilisé comme critère pour hiérarchiser les produits dans les files d'attente des outils de mesure et ainsi accélérer les mesures des produits provenant des outils de fabrications les plus critiques.

Le seuil d'arrêt (IL_z) : C'est le nombre maximal autorisé de produits à fabriquer sans contrôle de l'outil de fabrication. Si ce seuil est atteint, l'outil est arrêté jusqu'à ce que l'incertitude soit levée sur la quantité déjà fabriquée.

Nous détaillons dans les sous-sections qui suivent la manière avec laquelle ces paramètres peuvent être calculés pour les cas sans et avec délai.

6.1 Cas sans délais

Dans le cas sans délai entre fabrication et mesure, le seuil d'alerte WL n'a pas d'intérêt car la mesure est immédiate. Par contre, les seuils d'arrêt vont dépendre des contraintes liées au nombre minimale de contrôle qu'on peut avoir sur les

produits ou sur les opérations.

6.1.1 Sans contraintes sur les nombres de contrôles

C'est le cas où aucune contrainte n'est à prendre en compte en ce qui concerne le nombre minimal de contrôles à faire sur les produits ou sur les opérations, c'est à dire $n_i^{min} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}$. Dans ce cas (voir Figure 3.9) :

- Chaque outil de fabrication possède son propre TL_z qui correspond à la valeur idéale, en nombre de produit, de l'intervalle entre deux contrôles successifs de l'outil de fabrication $z \in \mathcal{Z}$. Ces valeurs sont déterminées à partir des résultats de calcul du plan de surveillance qui maximise l'efficacité de contrôles tout en maîtrisant le MAR global sur tous les outils de fabrication.
- Tous les outils de fabrication ont la même limite d'arrêt qui correspond à la valeur de R_L , i.e. $IL_z = R_L \quad \forall z \in \mathcal{Z}$

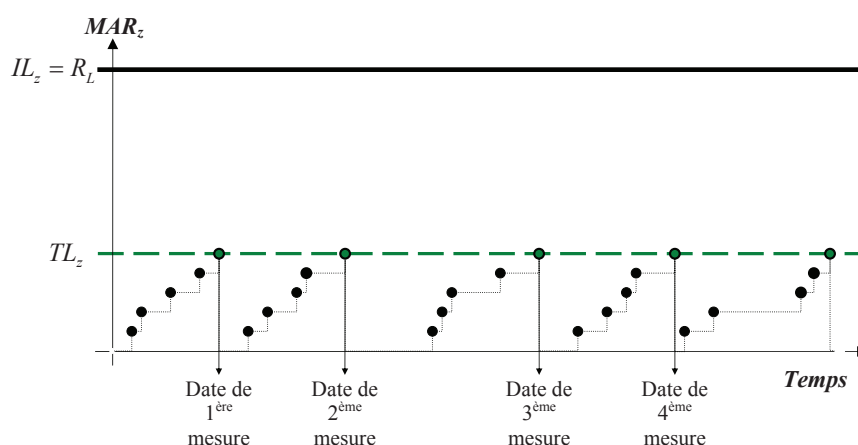


FIGURE 3.9 – Deux paramètres de contrôle de MAR dans les cas sans délais et sans contraintes sur les nombres de contrôles

6.1.2 Avec contraintes sur les nombres de contrôles

C'est le cas où certains produits ou certaines opérations sont contraints à être contrôlés avec un nombre (ou un taux) minimal exigé. Dans le cas où chaque opération i doit être contrôlée au moins n_i^{min} fois, la valeur de IL_z pour tout z est

calculée par la formule suivante :

$$IL_z = \min \left\{ R_L; \left[\frac{\hat{H}_z}{1 + \sum_{\substack{i \in \mathcal{I} \\ \mathcal{Z}^i \ni z}} [n_i^{min} \times DISP_{(i,z)}]} \right] \right\} \quad (3.38)$$

Si la contrainte est un taux d'échantillonnage minimal TE_i^{min} que doit vérifier chaque opération i , les IL_z peuvent être calculées de la façon suivante :

$$IL_z = \min \left\{ R_L; \left[\frac{\hat{H}_z}{1 + \sum_{\substack{i \in \mathcal{I} \\ \mathcal{Z}^i \ni z}} [\lceil TE_i^{min} \times N_i \rceil \times DISP_{(i,z)}]} \right] \right\} \quad (3.39)$$

Si la contrainte est un taux d'échantillonnage minimal TEP_p^{min} que doit vérifier chaque produit p , les IL_z peuvent être calculées de la façon suivante :

$$IL_z = \min \left\{ R_L; \left[\frac{\hat{H}_z}{1 + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{\substack{i \in \mathcal{I}^p \\ \mathcal{Z}^i \ni z}} [\lceil N_i \times TEP_p^{min} \rceil \times DISP_{(i,z)}]} \right] \right\} \quad (3.40)$$

6.2 Cas avec délais

En général, ce délai concerne le temps passé entre le moment où un produit, échantillonné pour être mesuré, sort de l'outil de fabrication et le moment où ce produit est effectivement mesuré et l'action de contrôle éventuelle est effectuée sur l'outil. Ce délai peut être dû à l'une (ou à l'ensemble) de raisons suivantes :

- Le temps de transfert de produit vers l'outil de mesure ;
- Les éventuelles étapes de processus de fabrication que doit faire le produit avant d'arriver à l'étape de mesure ;
- Le temps de mesure lui même ;
- Le temps d'analyse des données de mesure ;
- Le temps éventuel de diagnostic et d'action corrective de l'outil si une anomalie est détectée.

Pour prendre en compte ce délai dans le contrôle du MAR, il faut l'exprimer en nombre de produits que peut processor l'outil de fabrication pendant sa durée. Notons ce délai par τ_z exprimé en nombre de produits. Dans les deux paragraphes qui suivent, nous distinguons deux types de délais qui ont chacun leurs spécificités qui peuvent amener à une utilisation différente des paramètres de contrôle de MAR.

6.2.1 Délais fixes et incompressibles

Dans ce cas, la limite d'alerte WL a un rôle purement informatif sur le fait qu'aucun échantillon n'a été prélevé sur la machine depuis un certain temps et que si aucun échantillon n'est prélevé parmi les $(x - 1) \times \tau_z$ produits qui suivent, la machine va atteindre sa limite d'arrêt dans $x \times \tau_z$ produits. x est un réel positif qui doit être choisi au moins égal à 1 pour que cette notion d'alerte ait un sens. En effet, si $x < 1$, l'alerte à $x \times \tau_z$ produits de la limite d'arrêt ne servira à rien puisque même si un produit est échantillonné immédiatement à l'alerte, la machine va atteindre sa limite d'arrêt avant que la mesure ne soit effectuée. La figure 3.10 illustre l'utilisation de WL avec $x = 1,5$. Dans cet exemple, les 3 premiers échantillons ont bien été prélevés de façon à avoir le MAR cible. Ensuite, aucun produit n'a été mesuré ce qui a engendré, en premier lieu, une alerte lorsque le MAR a atteint WL_z et en second lieu l'arrêt de la machine lorsque la MAR a atteint IL_z . La machine va donc être arrêtée jusqu'à ce qu'un contrôle libératoire soit effectué.

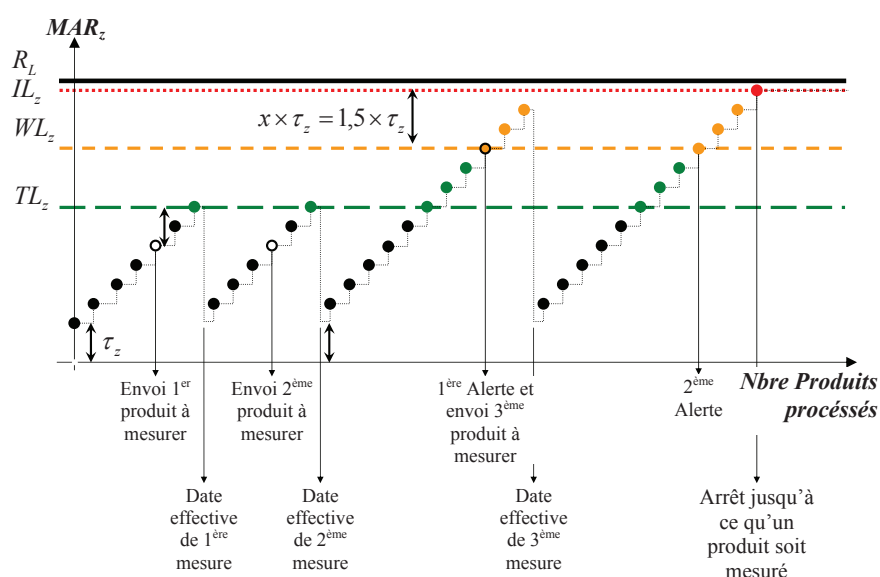


FIGURE 3.10 – Evolution du MAR et rôle du WL dans le cas avec délais fixe

6.2.2 Délais variables et compressibles

La variabilité des délais entre les outils de fabrication dont les MARs sont à contrôler peut provenir de la variabilité intrinsèque de chacun des temps cités précédemment qui peuvent les composer. D'autre part, comme les outils de mesure sont souvent des ressources partagées pour les mesures des produits provenant de plusieurs machines, le délai peut varier selon les lois de comportement des files d'attente devant ces outils de mesure. L'intérêt des limites d'alarme WL_z , dans ce cas, est d'aider à la décision quant à l'ordonnancement et/ou la hiérarchisation des produits dans les files d'attente devant les outils de mesure. Par exemple, il serait judicieux qu'un produit, dont la machine qui l'a traité est en alerte MAR, soit avancé dans la file d'attente de mesure sur un produit dont la machine qui l'a traité a un MAR au-dessous de sa valeur limite. Dans la Figure 3.11, l'échantillonnage pour contrôler le MAR de la machine est effectué de façon à avoir l'évolution idéale du MAR. Cependant, les mesures 4 et 5 ont eu du « retard » car leurs délais ont dépassé la valeur de délai moyen $\bar{\tau}_z$. L'alerte émise à la fin de 17^{ème} produit a permis d'accélérer la mesure du 5^{ème} produit échantillonné permettant ainsi de remettre le MAR. Au 27^{ème} produit fabriqué, le seuil IL_z est atteint causant ainsi l'arrêt de l'outil jusqu'à ce que l'échantillon 8 ait été mesuré.

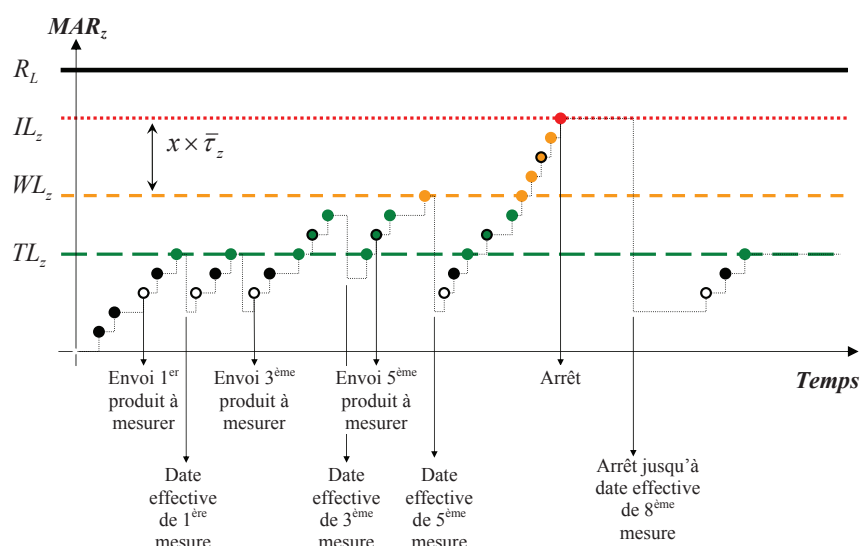


FIGURE 3.11 – Exemple d'évolution de MAR en présence de délais de mesure et des paramètres de contrôle WL et IL

7 Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons présenté et expérimenté notre approche assurantielle de conception de plan de surveillance. Le modèle simplifié basé sur cette approche a été détaillé et expliqué avec des exemples. Ce modèle se base sur la notion de Matériel A Risque pour maîtriser l'exposition du système de production à des pertes massives dues à une dérive ou une défaillance tardivement détectée. Le but était de définir un plan de surveillance qui limite le nombre de produits fabriqués après défaillance par des contrôles systématiques à une fréquence minimale garantie. Une fois le niveau d'exposition au risque maîtrisée, la maximisation de l'efficacité des contrôles planifiés est ensuite assurée en allouant plus du temps aux contrôles les plus efficaces. Ceci augmente encore plus la chance de détecter rapidement tout événement non désiré pouvant mettre en péril le processus de fabrication.

Comme le contrôle de processus en temps réel ne peut pratiquement pas être exécuté conformément au plan de surveillance cible, étant donné les aléas opérationnels, nous avons discuté certains paramètres permettant d'exécuter le plan de surveillance dans un contexte temps réel. Ces paramètres reflètent les tolérances du plan de surveillance cible et permettent de contrôler le MAR dans une perspective assurantielle lorsqu'ils sont associés à des décisions opérationnelles concernant la gestion des opérations de fabrication et des opération de contrôle.

Cette approche assurantielle utilisant un modèle simplifié de MAR nécessite d'être validé par des expérimentations mettant en évidence les aléas et les contraintes opérationnelles de contrôle de processus dans des conditions réelles. Des telles expérimentations ont été menés et vont être analysées dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

TESTS ET DISCUSSIONS SUR UN CAS INDUSTRIEL

Sommaire

1	Introduction	91
2	Présentation de l'étude de cas	91
2.1	Pourquoi mesurer la dimension critique	92
2.2	Planification des mesures CD	92
2.3	Calcul du Plan de surveillance cible et des paramètres de contrôle de MAR	93
3	La méthode d'expérimentation et ses limites	95
3.1	Méthode d'expérimentation	95
3.2	Avantages et limites de la méthode de simulation	98
3.3	Les instances testées	99
4	Résultats et discussions	99
5	Conclusion du chapitre 4	102

1 Introduction

Ce chapitre présente une étude expérimentale qui a été menée avec un partenaire industriel dans le cadre du projet européen IMPROVE. Le but est de tester l'approche assurantielle dans un contexte réel de fabrication en volume et de vérifier son avantage quant à la maîtrise du risque de pertes massives. Plus particulièrement, l'étude met en évidence l'importance des paramètres de contrôle du MAR conçu avec prise en compte des capacités disponibles de mesure tout en maximisant l'efficacité globale du plan de surveillance. Cette évaluation a fait l'objet d'une publication dans un journal international spécialisé dans la recherche en production [Bettayeb et al., 2011]. Cette étude permet aussi de mettre en évidence l'importance des délais qui peuvent exister entre les événements de fabrication et les événements de mesure et leurs impacts sur la maîtrise du risque (MAR).

2 Présentation de l'étude de cas

Cette étude de cas concerne la conception du plan de surveillance partiel de la mesure de dimension critique (CD : Critical Dimensions) dans une usine de semi-conducteurs. La dimension critique est définie comme la plus petite des caractéristiques géométriques (largeur de la grille de transistor, largeur de ligne d'interconnexion, largeur des contacts, etc) qui sont réalisées au cours de la fabrication des puces sur les plaquettes (voir Figure 4.1).

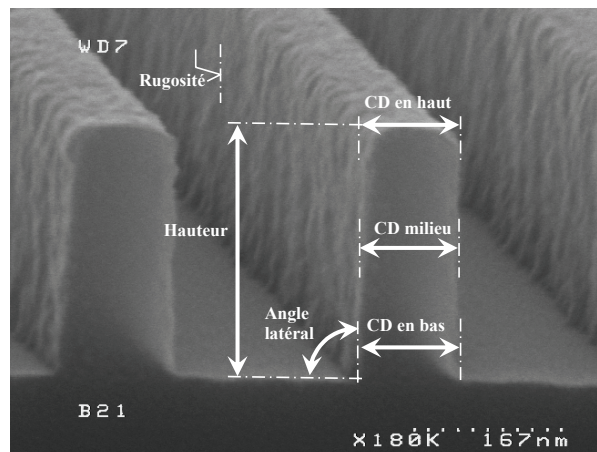


FIGURE 4.1 – La dimension critique (CD) illustrée sur une partie d'une image, obtenue par la technique MEB, d'une plaquette

2.1 Pourquoi mesurer la dimension critique

Un objectif clé dans la fabrication de semi-conducteurs est la capacité continue de produire des motifs géométriques de plus en plus petits sur les différentes couches d'une plaquette de silicium (« More Moore »). Ces formes, qui sont obtenues par des successions d'opérations des procédés de lithographie et de gravure, ont un rôle déterminant dans les fonctionnalités et les performances du produit final (la puce). La maîtrise de la variabilité des dimensions critiques est donc cruciale dans un processus de fabrication de puce. Les données de mesure CD sont souvent utilisées pour corriger les fluctuations des processus à court terme ainsi que les tendances à long terme. Cependant, pour les processus relativement stables, si ces mesures ne sont pas précises et reproductibles, elles peuvent avoir de mauvaises conséquences sur le procédé. Les deux techniques actuellement les plus utilisées pour la mesure CD sont la microscopie électronique à balayage (MEB) et la scatterométrie.

2.2 Planification des mesures CD

Dans cette étude, nous ne nous intéressons qu'à des opérations de processus dans lesquelles une mesure de CD est adaptée pour les contrôler : opérations de gravure et de photolithographie. Chaque opération a son propre sous-ensemble d'outils de processus qualifiés ainsi qu'un sous-ensemble d'outils de mesure qualifiés. Le modèle de flux est simplifié comme dans la Figure 4.2. Nous considérons deux retards τ_E et τ_L entre les ateliers de fabrication (Gravure et photolithographie) et l'atelier de mesure CD, respectivement. Le nombre d'outils qualifiés dans chaque atelier et les délais sont supposés constants (voir Tableau 4.1). Les données d'entrée utilisées dans cette étude de cas pour déterminer le plan de surveillance sont :

NPT_E : Nombre d'outils de fabrication dans l'atelier de gravure (Etch en anglais)

NPT_L : Nombre d'outils de fabrication dans l'atelier de photolithographie

NMT : Nombre d'outils dans l'atelier de mesure CD

P : Nombre de produits (technologies ou familles de produits)

I : Nombre total d'opérations à contrôler par la mesure CD

I_p : Nombre d'opérations du produit p à contrôler par la mesure CD

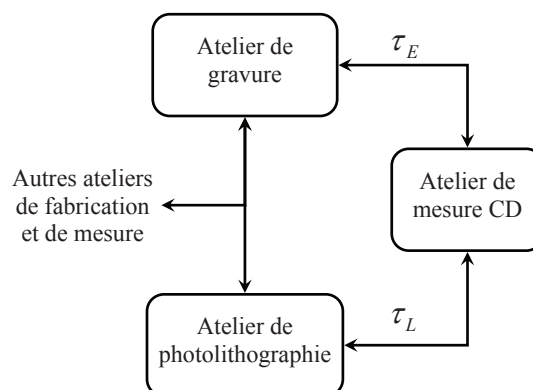


FIGURE 4.2 – Configuration des ateliers

Les outils de fabrication

Type outil de fabrication	TE _{xx}	TL _{xx}
Nbre Outils	23	13
τ _z (Nbre plaquettes)	177	116

Les outils de mesure

Type outils de mesure	TM1 _{xxx}	TM2 _{xxx}
Nbre Outils	NTM1	NTM2
Temps moyen de mesure (min)	MT_TM1	MT_TM2

TABEAU 4.1 – Les ressources matérielles prises en considération

	Outils de Gravure « TE _{xx} »	Outils de Photolithographie « TL _{xx} »	Total
Nbre Oper.	102	211	313
Moyenne de Cpk	1,53	2,27	2,03

TABEAU 4.2 – Caractéristiques des outils de fabrication

2.3 Calcul du Plan de surveillance cible et des paramètres de contrôle de MAR

Cette étude de cas présente une spécificité liée au délai non négligeable que subit un lot entre l'outil de fabrication (gravure ou photolithographie) sur lequel il a

subit une opération de procédé et l'outil de mesure CD. Ce délai, qui est fortement dépendant de la stratégie l'échantillonnage en place, a un impact important sur l'évolution du MAR de chacun des outils de fabrication. L'heuristique proposée dans le chapitre 3, qui suppose que ce délai est nul, est adaptée au cas avec délais variables et compressibles (Cas Chap. 3.§ 6.2.2) pour calculer le plan de surveillance cible et les paramètres de contrôle de MAR. Les hypothèses 2 et 3 du modèle sans délais (Chap. 3.§ 3.2) sont remplacées par :

Hypothèse 2' : Un contrôle lève 100% de l'incertitude sur les produits et sur le processus au moment où l'échantillon est prélevé et n'est effectif qu'après un délai τ_z propre à l'outil de fabrication. $\forall t_i \in T \text{ } MAR^x(\tau_z + t_i^-) \neq 0$ et $MAR^x(\tau_z + t_i^+) = \tau_z$ (voir Figure 4.3). τ_z étant le délai de l'outil z exprimé en nombre de produits fabriqués.

Hypothèse 3' : Il y a un retard non nul sur chaque contrôle, c'est le temps passé entre l'instant où le produit est échantillonné pour être mesuré et l'instant où la mesure est réellement effectuée.

Ce qui change est le calcul effectué à l'Etape 1 de l'heuristique. En effet, cette étape sera basée sur le modèle d'évolution du MAR, qui intègre un délai moyen, présenté dans la figure 4.3. Avec ce modèle, la propriété 1. (Chap. 3.§ 3.3) devient :

Propriété 2.

Si un délai constant τ_z existe entre la fabrication et la mesure et dans le cas où la fonction MAR_z est continue par morceaux sur $]t_k + \tau, t_{k+1} + \tau_z]$ $\forall k \in \{0, n_z\}$ avec $t_0 = 0, t_{n_z+1} + \tau_z = H_z$ et $t_k \in]t_{k-1}, H_z - \tau_z[$ $\forall k = 1, \dots, n_z$, il existe une répartition équidistante des dates de contrôle sur l'horizon $H_z - \tau_z$ qui minimise sa valeur maximale du MAR de l'outil z :

$$\min_{T^z} MAR_{(z, max)}^x = \tau_z + \frac{H_z - \tau_z}{n_z + 1} \quad \forall x \in X^{n_z} \quad (4.1)$$

avec

X^{n_z} : ensemble des plans de surveillance contenant n_z contrôles des produits opérés sur l'outil z

$T^z = (t_{(z,1)}, \dots, t_{(z,n_z)})$: Dates des contrôles des produits effectués sur l'outil z

Dans ce cas, les dates optimales des contrôles de l'outil z sont définies par T^{z*} comme suit :

$$t_{(z,i)}^* = i \times \frac{H_z - \tau_z}{n_z + 1} \quad \forall i \in \{1, \dots, n_z\} \quad (4.2)$$

Preuve 2. Voir Annexe C

Cette propriété est utilisée de la même manière que dans le chapitre précédent, pour définir n_i^1 les nombres minimaux de contrôles des opérations comme suit :

$$n_i^1 = \max_{z \in \mathcal{Z}^i} \left[N_i \times \left(\frac{1 - \frac{\tau_z}{\hat{H}_z}}{R_L - \tau_z} - \frac{1}{\hat{H}_z} \right) \right] \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (4.3)$$

Avec

$$\hat{H}_z = \sum_{i \in \mathcal{I}} [N_i \times \mathcal{DISP}_{(i,z)}] \quad \forall z \in \mathcal{Z}$$

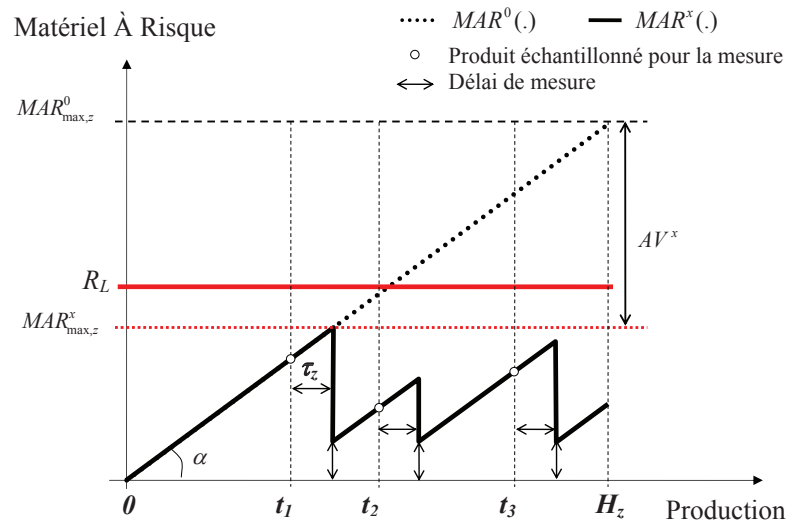


FIGURE 4.3 – Modèle de MAR en présence d'un délai entre fabrication et mesure

L'étape 2 de l'heuristique reste inchangée et permet d'ajuster le plan de surveillance minimal calculé à l'étape 1 en utilisant le critère d'efficacité des contrôles pour optimiser l'utilisation de la capacité de mesure disponible.

3 La méthode d'expérimentation et ses limites

3.1 Méthode d'expérimentation

Dans le cadre du projet européen IMPROVE, l'objectif est de présenter des démonstrations de concepts proposés car leurs intégrations dans les systèmes manufacturiers réels n'est pas évidente et fera parti d'une extension probable du projet. Pour cela, les expérimentations sont effectuées par simulation en utilisant des données historiques de fabrication et de contrôle qui ont été fournies par un industriel de semi-conducteurs qui notre partenaire du projet. La méthode

d'expérimentation, utilisée pour tester notre approche, est schématisé dans la Figure 4.4 dont chacune des étapes est détaillée dans les paragraphes suivants.

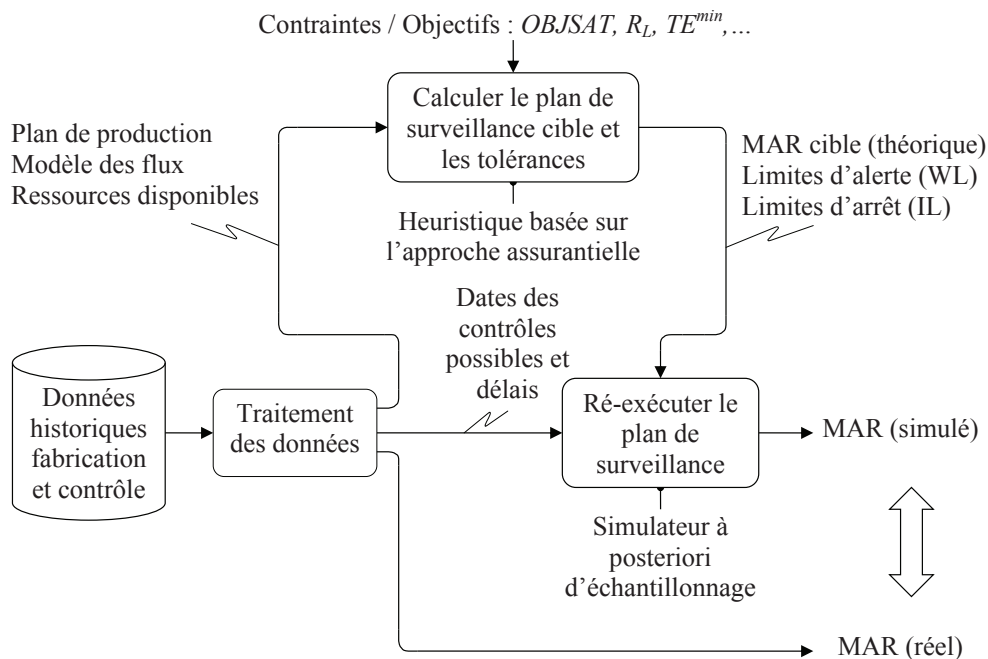


FIGURE 4.4 – Méthode d'expérimentation

3.1.1 Les données supports de la simulation

Les simulations effectuées sont basées sur des données historiques de fabrication et de contrôle. Chaque instance testée correspond à une requête dans les bases de données correspondantes sur une fenêtre temporelle pour extraire les données traçant l'exécution des opérations des procédés de photolithographie et de gravure ainsi que les données relatives à l'exécution des opérations de mesure CD.

3.1.2 Traitement des données

Les données historiques de fabrication et de contrôle sont traitées pour, en premier lieu, reconstituer les entrées nécessaires pour calculer un plan de surveillance cible, ces entrées sont :

- ▷ le plan de production pour la période considérée : Les produits (à) fabriqués(er) et leurs quantités
- ▷ l'ensemble des outils de fabrication et des outils de mesure utilisés

- ▷ les différents temps de liés à
 - la durée d'exécution d'une opération de fabrication
 - la durée d'exécution d'une opération de mesure
 - le délai entre l'instant d'exécution et l'instant de mesure d'une opération

Ces données sont aussi utilisées pour tracer l'évolution du MAR avec la politique actuelle d'échantillonnage des lots pour la mesure CD. Ce MAR réel est utilisé comme référence pour évaluer l'apport de notre approche. D'autre part, les dates des mesures CD réalisées sont gardées et utilisées dans la simulation comme étant les seules dates possibles de mesure des lots qui vont être échantillonnées en suivant notre approche de calcul du plan de surveillance.

3.1.3 Calculer le plan de surveillance cible

Le plan de surveillance cible est calculé en utilisant les caractéristiques de l'instance qui sont reconstituées dans la phase de traitement de données. Le plan de surveillance obtenu permet de déterminer les paramètres de contrôle du MAR des outils de fabrication qui seront utilisés dans le simulateur d'échantillonnage des mesures CD.

3.1.4 Simulateur à posteriori d'échantillonnage

Le simulateur d'échantillonnage permet de ré-exécuter la politique de contrôle en utilisant les nouveaux paramètres de contrôle du MAR et d'évaluer son nouveau comportement. Le principe du simulateur est schématisé dans la Figure 4.5. L'échantillonnage des lots à mesurer est effectué sur les données historiques de chaque outil de fabrication en marquant comme « lot à contrôler » ceux qui correspondent à un MAR absolu de l'outil (MAR_z^0) multiple de sa limite cible TL_z calculée par l'heuristique. Par exemple, dans la Figure 4.5 le lot LOT_k est marqué « à contrôler » car le nombre de plaquettes fabriquées sur l'outil z depuis le dernier lot marqué (LOT_l) est supérieur ou égal à TL_z . Ensuite, connaissant la date de fabrication de chaque lot marqué, une date de mesure M_date_l est choisie parmi les dates disponibles dans l'historique des mesures. Cette dernière doit correspondre à un lot mesuré sur l'un des outils de mesure qualifiés pour l'opération exécutée sur le lot lors de son marquage ($OPER_i$). De plus, la date choisie M_date_l doit être ultérieure à la date de fabrication P_date_l plus le délai estimé $\hat{\tau}_z$ entre l'outil de fabrication et l'outil de mesure. Le MAR simulé est réduit à chaque nouvel instant de mesure (M_date_l) par sa valeur à l'instant où le lot a été marqué ($MAR_z^{simul}(P_date_l)$).

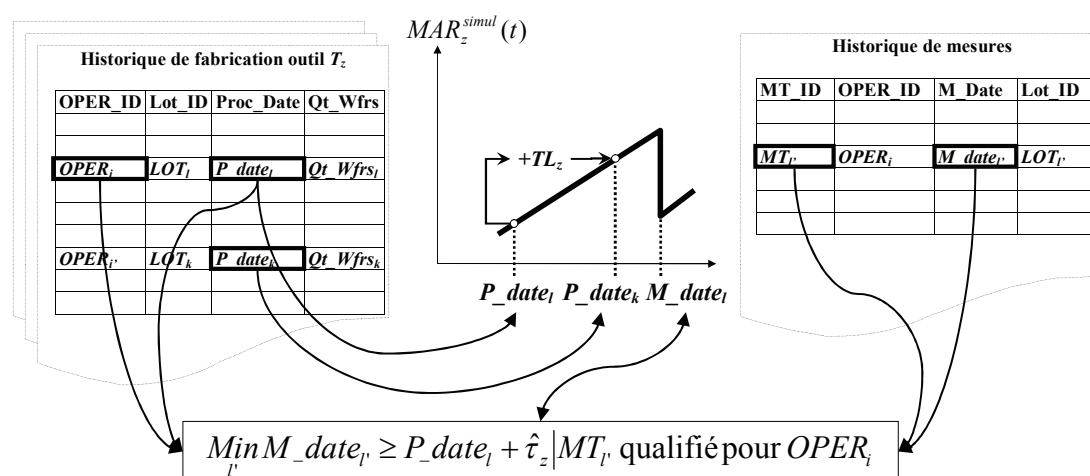


FIGURE 4.5 – Le principe du simulateur d'échantillonnage à partir des historiques de fabrication et de mesure CD

3.2 Avantages et limites de la méthode de simulation

Cette méthode de simulation est très spécifique et présente en conséquence quelques avantages et quelques limites. Notons que cette méthode utilise des données réelles issues d'une usine fabrication de semi-conducteurs qui sont représentatives des aléas opérationnels qui peuvent impacter les performances attendues du processus de contrôle. Ces aléas liés aux temps de fabrication, aux temps de mesure et aux temps de transfert et d'attente des lots peuvent être des éléments perturbateurs pour une exécution scrupuleuse du plan de surveillance qui est nécessaire à la maîtrise des risques en termes de détectabilité. Ces aléas sont d'autant plus gênants si le plan de surveillance n'est pas conçu avec l'anticipation d'un minimum de ces aléas prévisibles. De plus, cette méthode est en quelque sorte une reconstitution de déroulement du processus de contrôle avec une stratégie nouvelle et différente permettant ainsi d'évaluer son apport par rapport à l'ancienne pratique. Elle permet d'évaluer le gain potentiel en termes de MAR, qui influence directement la détectabilité, dans les mêmes conditions opérationnelles et en présence des mêmes aléas.

Une des limites de la méthode réside dans le choix de la séquence des outils lors de l'application de la nouvelle stratégie d'échantillonnage. En effet, les premiers outils traités avec le simulateur vont avoir plus de possibilités de choix des dates de mesure : les lots échantillonnés le plus proche des dates de fabrication seront sélectionnés, ce qui signifie un MAR mieux maîtrisé. Dans les simulations présentées ici, le choix était de traiter les outils suivant un ordre alphabétique. Un

autre séquençement dans le traitement des outils par le simulateur aurait sûrement donné des résultats sensiblement différents. Néanmoins, et malgré ce choix aléatoire de la séquence, ces simulations peuvent donner au moins une idée sur les gains potentiels en termes de réduction des risques liés à une meilleure maîtrise du MAR.

L'estimation des délais de mesure présente une deuxième limite de la méthode. Ces estimations sont basées sur les historiques de fabrication et de mesure des lots selon l'ancienne stratégie de contrôle. Or, ces délais risquent d'être sensiblement différents avec une nouvelle stratégie. En effet, chaque nouvelle stratégie de contrôle peut engendrer des comportements différents des certains paramètres qui composent ces délais, notamment les temps de séjour des lots dans les files d'attente de machines de mesure. Ces derniers sont fortement corrélés au nombre de lots échantillonnés et leurs fréquences [Sahnoun et al., 2012].

3.3 Les instances testées

Trois instances ont été testées correspondant à des historiques de données issues de notre partenaire industriel ST-Microelectronics à Crolles, France. Ces historiques correspondent à une production d'un mois sur des périodes différentes (Voir Tableau 4.3). La dernière colonne de ce tableau correspond au nombre total de plaquettes opérées (tous produits confondus) dans chacune des instances.

Q_p	PRODUIT						Total
	p1	p2	p3	p4	p5	p6	$\sum_p Q_p$
Instance1 (1 mois)	8190	11446	10798	3263	3089	12899	49685
Instance2 (1 mois)	15087	8827	11943	2946	11177	4196	54176
Instance3 (1 mois)	14823	7256	5756	2651	13674	3952	48112

TABLEAU 4.3 – Les trois instances expérimentées

4 Résultats et discussions

Dans ces expérimentations, l'évaluation de l'approche proposée par la simulation se base sur la comparaison de certains indicateurs liés au MAR réel et simulé ($x \in \{\text{réel, simul.}\}$). Les indicateurs analysés sont les suivants :

- $\max_{t \in T^{\text{ins}}} \text{MAR}_z^x(t)$: La valeur maximale qu'a atteint le MAR de l'outil de fabrication z durant l'horizon temporel considéré de l'instance testé T^{ins} ($\text{ins} \in \{\text{Instance1}, \text{Instance2}, \text{Instance3}\}$);
- $\min_{t \in T^{\text{ins}}} \text{MAR}_z^x(t)$: La valeur minimale du MAR qu'a pu atteindre un outil de fabrication z durant l'horizon temporel considéré T^{ins} ;
- $\text{moy}_{t \in T^{\text{ins}}} \text{MAR}_z^x(t)$: La valeur moyenne du MAR de l'outil de fabrication z durant l'horizon temporel considéré T^{ins} ;
- $\sum_{z \in \mathcal{Z}} \text{MAR}_z^x(t)$: La valeur globale du MAR (tous outils confondus) à l'instant t ;
- $\max_{z \in \mathcal{Z}} \text{MAR}_z^x(t)$: La valeur maximale du MAR parmi tous les outils de fabrication à l'instant t ;
- $\text{moy}_{z \in \mathcal{Z}} \text{MAR}_z^x(t)$: La valeur moyenne du MAR sur l'ensemble des outils de fabrication à l'instant t .

Les résultats des simulations des trois instances sont présentés sur les figures 4.6 et 4.7

La Figure 4.6 présente, pour les trois instances testées, les variations du MAR réel (couleur rouge) et du MAR simulé (couleur verte) pour chacune des outils de fabrication qui sont comparées à leurs valeurs cible du MAR (losange noir). Les valeurs moyennes du MAR des outils sont représentées par un carré rouge pour le cas réel et par un triangle vert pour le cas simulé. Les traits horizontaux interrompus (marron pour cas réel et vert pour le cas simulé) correspondent aux moyennes des valeurs maximums du MAR qu'à atteint l'ensemble des outils de gravure (TE_{xx}) et l'ensemble des outils de photolithographie (TL_{xx}), séparément.

La première constatation concerne les valeurs de limites cible du MR (TL_z). Ces valeurs, qui sont calculées par l'heuristique, sont pour les outils de photolithographie (TL_{xx}) significativement inférieures à celles des outils de gravure (TE_{xx}). Cette différence est justifiée par le fait que ces derniers sont en moyenne plus capables que les outils de photolithographie (Moyenne de Cpk(TL_{xx})= 2,27 et Moyenne de Cpk(TE_{xx})= 1,53, voir Tableau 4.2). En effet, comme l'heuristique, dans sa 2^{ème} étape, alloue plus de capacité de mesure aux opérations dont les outils de fabrication qualifiés sont les moins capables, cela engendre plus de contrôles imputés aux outils de fabrication ayant des faibles indices de capacité.

La deuxième constatation vient du fait que dans les trois instances la stratégie

actuelle ($MAR^{\text{réel}}$) d'échantillonnage des mesures CD ne permet pas de maîtriser efficacement le niveau de risque. En effet, les différences entre les variations des niveaux d'exposition au risque sont très visibles entre les différents outils de fabrication. Certains outils atteignent des niveaux de MAR relativement élevés et souvent très supérieurs à leur niveau théorique maximal du MAR (TL_z). De plus, sur l'horizon temporel de l'instance, même les valeurs moyennes des MAR de certains outils sont supérieures à cette valeur théorique. Les résultats liés à l'évolution du MAR dans le cas simulé présentent des variations nettement mieux maîtrisées. Dans ce cas, les valeurs de $\max_t MAR_z(t)$ se rapprochent des valeurs TL_z avec des valeurs moyennes du MAR clairement inférieures.

La Figure 4.7 présente l'évolution temporelle des principaux indicateurs liés au MAR des outils de fabrication des trois instances dans le cas réel et le cas simulé. L'axe des abscisses contient les fenêtres temporelles des trois instances. Les abscisses sont les instants qui correspondent à un des deux événements qui font varier le MAR : un lot est opéré sur l'un des outils de fabrication, ce qui fera augmenter son MAR, ou un lot est mesuré sur l'un des outils de mesure, ce qui fera baisser le MAR du dernier outil sur lequel il a été opéré. Les fluctuations importantes des indicateurs présentés sur la Figure 4.7 peuvent être expliquées par la grande complexité du processus de fabrication et le caractère stochastique des temps qui régissent les flux physiques. De plus, les opérations de photolithographie/gravure et mesure CD ne constituent qu'une petite partie des centaines d'opérations de fabrication et de mesure qui composent le processus global. Ces statistiques sur l'évolution temporelle du MAR dans le cas simulé, comparés aux cas réel, montrent qu'il est possible de baisser les fluctuations du MAR et ainsi diminuer l'exposition au risque. Ces pertes peuvent atteindre des milliers de produits si plusieurs outils sont impactés en même temps par des événements non désirés dus à des causes communes ou indépendantes.

Il faut aussi remarquer la relative stabilité, dans les résultats de simulations, de certains indicateurs à travers les trois instances. Par exemple, les fluctuations de la somme des MAR de l'ensemble des outils dans le cas simulé sont autour d'une valeur moyenne pratiquement constante (voir Tableau 4.5) alors que ce n'est pas le cas avec les résultats correspondants au cas réel.

L'apport de cette réduction de l'exposition aux risque avec un MAR maîtrisé peut aussi être vu sous un angle relatif aux coûts des assurances. Les gains potentiels sont non négligeables si le coût de l'assurance est calculé en se basant sur un nombre de plaquettes à couvrir. Cette assurance permet d'indemniser les clients quand ils sont impactés au niveau de la qualité, de délais ou de volume. Si nous

supposons que le coût d'une plaquette à la sortie de processus de fabrication est de l'ordre de 10000\$, le gain en coût d'assurance est donc proportionnel au gain réalisé en MAR multiplié par le coût d'une plaquette. En se basant sur la réduction du $Moy_z MAR_{max,z}$ qui est de l'ordre de 200 plaquette en moyenne sur les trois instances, la gain potentiel en coût d'assurance est de l'ordre de 2 Million\$.

	$\text{moy}_{t \in T^{\text{ins}}} \sum_z MAR_z(t)$		$\text{moy}_{t \in T^{\text{ins}}} \max_z MAR_z(t)$		$\text{moymoy}_{t \in T^{\text{ins}} z \in \mathcal{Z}} MAR_z(t)$	
	réel	simulé	réel	simulé	réel	simulé
Instance1	4532	3478	433	216	131	100
Instance2	5531	3655	519	217	159	105
Instance3	4369	3648	335	213	126	105

TABLEAU 4.5 – Résultats moyennes des trois indicateurs pour les trois instances

5 Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude de cas industriel pour expérimenter l'approche assurantielle de conception des plans de surveillance. Les expérimentations ont été effectuées en utilisant une approche de simulation par reconstitution de l'exécution des opérations de contrôle effectuées sur les produits avec une nouvelle stratégie de contrôle du MAR conforme au nouveau plan de surveillance proposé. La méthode de simulation et ses limites ont été présentées et discutées. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la planification de surveillance dans le contrôle du risque opérationnel. En effet, une planification rationnelle basée sur la maîtrise du MAR et intégrant les caractéristiques des flux et des ressources semble être une approche robuste pour maîtriser les risques opérationnels. Nous pensons que cette activité de planification est nécessaire mais non suffisante, car la maîtrise des risques opérationnels basée sur le contrôle de MAR est fortement influencée par les décisions opérationnelles de contrôle des flux physiques dans l'usine. Il est donc nécessaire d'intégrer dans ces décisions des objectifs et des contraintes tenables liées au MAR.

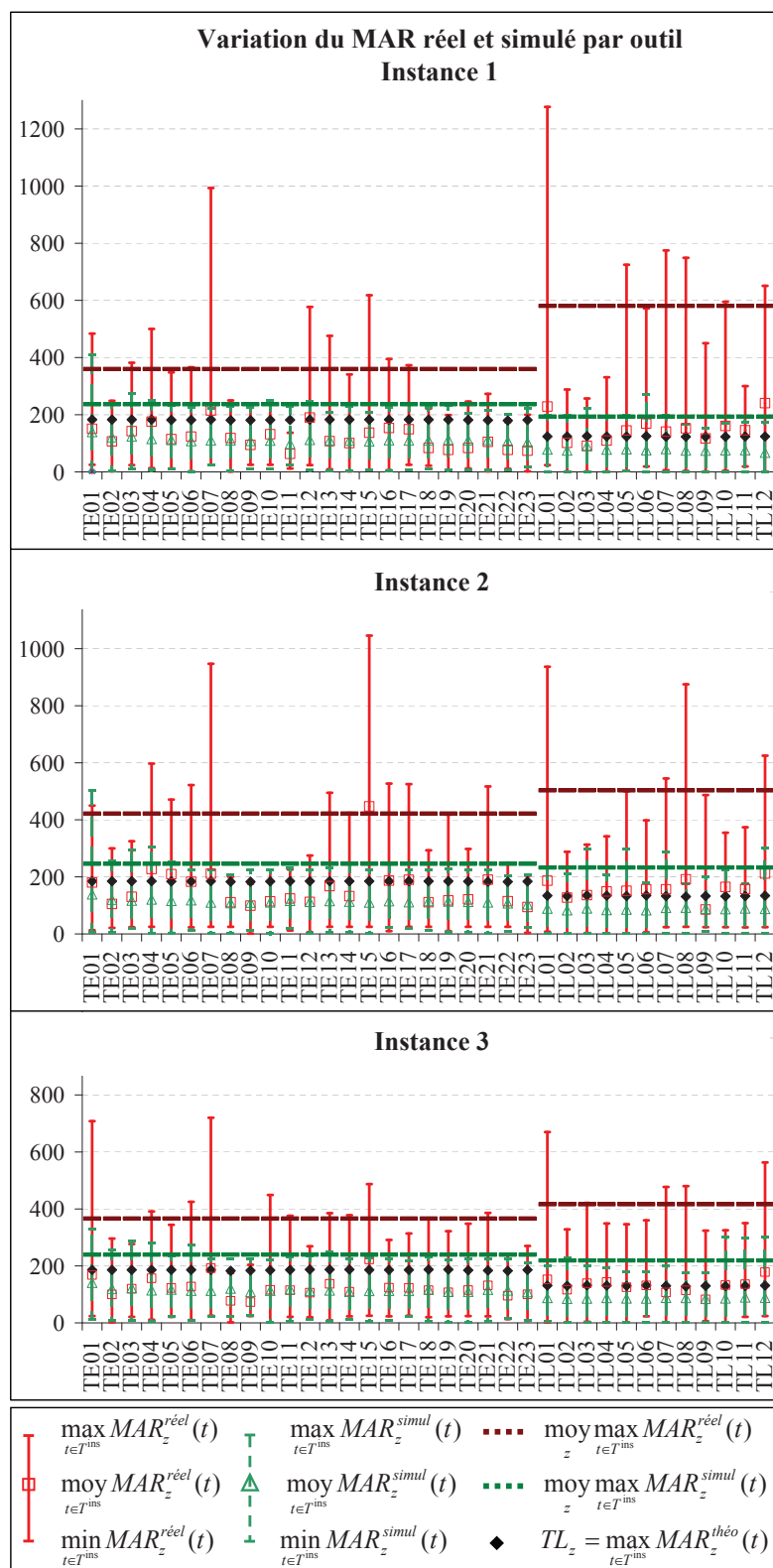


FIGURE 4.6 – Variations du MAR réel et simulé par outil

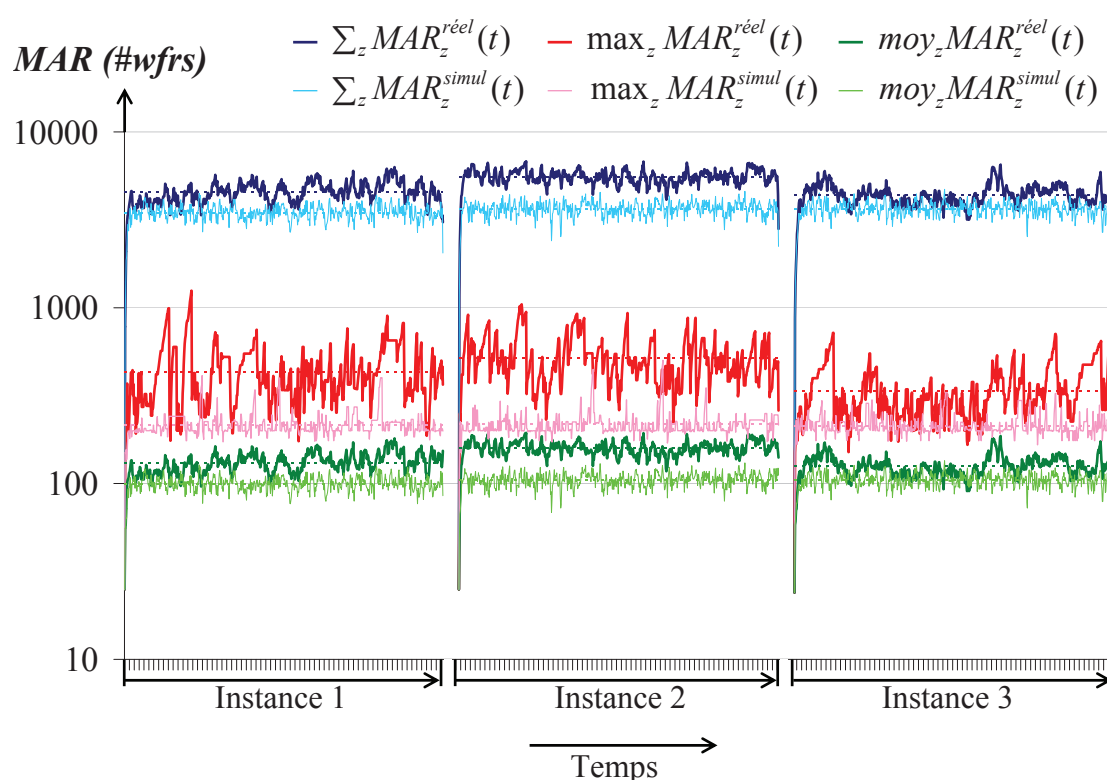


FIGURE 4.7 – Récapitulatif des 3 instances

Chapitre 5

VERS UN MODÈLE GÉNÉRALISÉ : MULTI-RISQUES, MULTI-COUCHES DE PROTECTION

Sommaire

1	Introduction	107
2	Formalisation généralisée de plan de surveillance	107
2.1	Les entrants	107
2.2	Modélisation des flux	108
2.3	Les modes de défaillances	111
2.4	Modèle de surveillance	113
3	Un modèle générique du MAR	116
3.1	Taux d'accroissement du risque	116
3.2	Délai de contrôle	117
3.3	Effet de contrôle	117
3.4	Caractérisation du MAR générique	118
4	Conception du plan de surveillance généralisé	121
4.1	Minimiser la charge de contrôle en maîtrisant le niveau d'exposition aux risques	121
4.2	Maximiser l'efficacité globale du plan de surveillance en maîtrisant le niveau d'exposition aux risques	123
4.3	Maximiser la détectabilité globale des modes de défaillance	123
5	Conclusion du chapitre 5	125

1 Introduction

Jusqu'à présent, nous avons proposé une méthode de conception de plan de surveillance basée sur la maîtrise du MAR dans le cas simple d'un seul mode de défaillance avec un seul niveau de protection situé immédiatement en aval de l'étape de processus potentiellement impactée par la défaillance. Ce chapitre est une généralisation du concept de MAR dans les cas où le processus est sujet à plusieurs modes de défaillances dont les instanciations peuvent être surveillées par plusieurs couches de protection. Le but est de modéliser cette généralisation et proposer une méthode de conception d'un plan de surveillance permettant de maîtriser au mieux les risques opérationnels en exploitant, de façon cohérente et coordonnée, l'ensemble des ressources limitées de maîtrise.

2 Formalisation généralisée de plan de surveillance

2.1 Les entrants

La conception d'un plan de surveillance basé sur le risque nécessite la prise en compte de certains entrants qui caractérisent le contexte et les contraintes liés au système de production. Les principales données d'entrée sont présentées dans la Figure 5.1. Tout d'abord, la plan de surveillance basé sur le risque doit tenir compte des volumes de production planifiés. En effet, l'objectif de la définition et l'application d'un plan de surveillance est de maîtriser les performances du système de production non seulement en termes de qualité, coût et délai, mais aussi en termes de volume. Pour cela, il est essentiel de prendre en compte les volumes planifiés de chaque produit qui sont définis dans la plan de production.

L'objectif étant de concevoir un plan de surveillance « cible » à appliquer sur une future période de temps, cette étude considère un horizon temporel fictif de planification, qui est traduit par les différentes quantités à produire $Q_p \in \mathcal{Q}$ de chaque produit $p \in \mathcal{P}$ dans le plan de production, avec $\mathcal{P} = \{1, 2, \dots, p, \dots, P\}$ et $\mathcal{Q} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_p, \dots, Q_P\}$. La fin de l'horizon temporel coïncide avec la fin de la réalisation des toutes les opérations planifiées. Chaque produit nécessite l'exécution successive de l'ensemble d'opérations de fabrication $\mathcal{I}^p \subset \mathcal{I}$ qui vont être répétées Q_p fois chacune.

Il est aussi important de connaître au préalable le modèle des flux de processus de fabrication de chacun des produits inclus dans le plan de production. Ce modèle de flux est nécessaire pour déterminer l'exposition opérationnelle relative à

chacun des outils de fabrication en termes de nombre d'opérations exécutées. Ce dernier est fonction du modèle de flux de processus, des quantités de produits à fabriquer et de la répartition de charge sur les outils de fabrication qualifiés.

Les autres entrants de la conception du plan de surveillance concernent les performances nominales (capacité, vitesse, etc) et les disponibilités des ressources de production, de mesure et d'action.

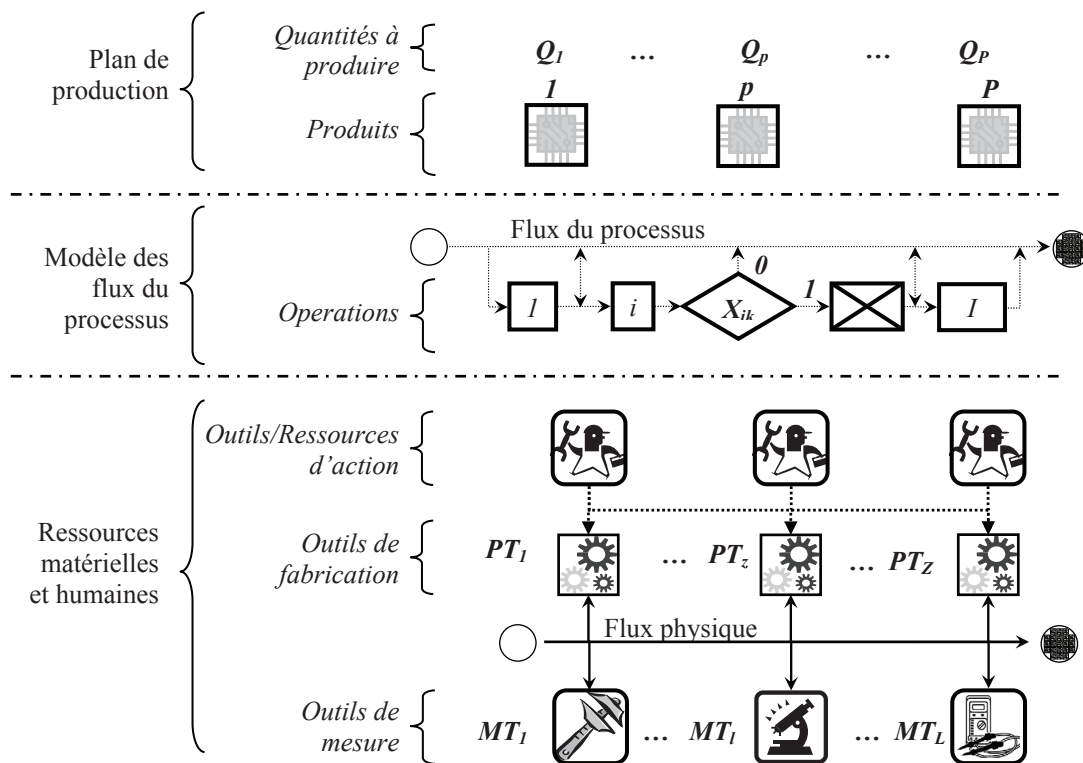


FIGURE 5.1 – Les entrées d'un plan de surveillance basé sur le risque

2.2 Modélisation des flux

2.2.1 Flux de processus

Le processus de fabrication à modéliser est caractérisé par un grand nombre d'opérations de fabrication et de mesure qui sont réalisées de manière séquentielle sur des outils de fabrication et de mesure avec des flux ré-entrants. Les flux de processus représentent la succession des opérations de procédé que doit subir chaque exemplaire d'un produit donné. Ces opérations sont intercalées par des opérations de mesure qui seront effectuées sur les exemplaires échantillonnés se-

lon la politique définie par le plan de surveillance. Les opérations de procédés de chacun des produits sont concaténées pour former la liste complète des opérations de procédé à prendre en considération (OP). Chaque produit p ayant I^p opérations de procédé ($\{OP_1^p, \dots, OP_{i^p}^p, \dots, OP_{I^p}^p\}$), le nombre total des opérations est

$$I = \sum_{p=1}^P I^p \quad (5.1)$$

Un seul indice $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ peut être utilisé en agrégeant le numéro de l'opération i^p et l'indice du produit p : $OP_i \longleftrightarrow OP_{i^p}^p$ avec

$$i = i^p + \sum_{p'=1}^{p-1} I^{p'} \quad (5.2)$$

De la même façon, la liste des opérations de mesure (OM) est constituée de la concaténation des opérations de mesure susceptible d'être effectué sur chacun des produits.

$$OP = \begin{bmatrix} OP_1 \\ \vdots \\ OP_i \\ \vdots \\ OP_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} OP_1^1 \\ \vdots \\ OP_{I^1}^1 \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} OP_1^p \\ \vdots \\ OP_{I^p}^p \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} OP_1^P \\ \vdots \\ OP_{I^P}^P \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad OM = \begin{bmatrix} OM_1 \\ \vdots \\ OM_m \\ \vdots \\ OM_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} OM_1^1 \\ \vdots \\ OM_{M^1}^1 \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} OM_1^p \\ \vdots \\ OM_{M^p}^p \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} OM_1^P \\ \vdots \\ OM_{M^P}^P \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Les liens de précedence entre les opérations de procédé et celles de mesure sont modélisés par la matrice PRE où

$$pre_{(i,m)} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'opération de procédé } OP_i \text{ précède l'opération de} \\ & \text{mesure } OM_m \text{ où elle peut être mesurée ;} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\begin{array}{c}
 \text{Opérations de mesure} \\
 \overbrace{\quad \quad \quad} \\
 OM_1 \quad \dots \quad OM_m \quad \dots \quad OM_M \\
 \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\
 \left[\begin{array}{ccccc}
 pre_{(1,1)} & \dots & pre_{(1,m)} & \dots & pre_{(1,M)} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 pre_{(i,1)} & \dots & pre_{(i,m)} & \dots & pre_{(i,M)} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 pre_{(I,1)} & \dots & pre_{(I,m)} & \dots & pre_{(I,M)}
 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \leftarrow OP_1 \\ \vdots \\ \leftarrow OP_i \\ \vdots \\ \leftarrow OP_I \end{array} \right\} \text{Opérations de procédé}
 \end{array} \quad (5.5)$$

2.2.2 Flux physiques

Les flux physiques correspondent aux produits transférés entre les outils de fabrication et les outils de mesure. Ces mouvements, qui dépendent de la politique d'ordonnancement en place, sont régis par la qualification et la disponibilité des ressources de production. Les qualifications des outils de fabrication et de mesure sont représentées par les matrices QPT et QMT , respectivement. Les éléments de ces matrices sont caractérisés par :

$$qpt_{(i,z)} = \begin{cases} CP_{(i,z)} & \text{L'indice de capabilité de processus, si l'outil } z \\ & \text{est qualifié pour exécuter l'opération de procédé} \\ & OP_i; \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$qmt_{(m,l)} = \begin{cases} CPM_{(m,l)} & \text{L'indice de capabilité de mesure, si l'outil } l \text{ est} \\ & \text{qualifié pour exécuter l'opération de mesure} \\ & OM_m; \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (5.7)$$

L'indice de capabilité (de processus ou de mesure) est un indicateur d'aptitude d'une ressource à exécuter une tâche donnée qui peut être agrégé avec d'autres indicateurs de performance pour constituer un critère de performance à optimiser lors de la conception d'un plan de surveillance. En effet, comme le but du plan de surveillance est de maîtriser les risques opérationnels liés à l'exécution des opérations de production, et comme les ressources de maîtrise sont souvent limitées, ce genre de critère peut être utile pour une répartition rationnelle de l'effort de surveillance. Quelques indices de capabilité de processus ont été présentés dans le Chapitre 2 (§ 4.2.2). La capabilité de mesure est calculée en utilisant

le même principe : Intervalle de tolérance correspondant à l'échantillon mesuré divisé par la dispersion des mesures réalisées.

$$\begin{array}{c}
 \text{Outils de fabrication} \\
 \overbrace{PT_1 \quad \dots \quad PT_z \quad \dots \quad PT_Z} \\
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 QPT = \begin{bmatrix} qpt_{(1,1)} & \dots & qpt_{(1,z)} & \dots & qpt_{(1,Z)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ qpt_{(i,1)} & \dots & qpt_{(i,z)} & \dots & qpt_{(i,Z)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ qpt_{(I,1)} & \dots & qpt_{(I,z)} & \dots & qpt_{(I,Z)} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow OP_1 \\ \vdots \\ \leftarrow OP_i \\ \vdots \\ \leftarrow OP_I \end{array} \quad (5.8) \\
 \text{Outils de mesure} \\
 \overbrace{MT_1 \quad \dots \quad MT_l \quad \dots \quad MT_L} \\
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 QMT = \begin{bmatrix} qmt_{(1,1)} & \dots & qmt_{(1,l)} & \dots & qmt_{(1,L)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ qmt_{(m,1)} & \dots & qmt_{(m,l)} & \dots & qmt_{(m,L)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ qmt_{(M,1)} & \dots & qmt_{(M,l)} & \dots & qmt_{(M,L)} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow OM_1 \\ \vdots \\ \leftarrow OM_m \\ \vdots \\ \leftarrow OM_M \end{array} \quad (5.9)
 \end{array}$$

2.3 Les modes de défaillances

L'objectif du plan de surveillance est de définir la stratégie de surveillance à mettre en place pour détecter et éliminer, le plus rapidement possible, les événements, qui sont l'instanciation des modes de défaillance, qui peuvent conduire à des pertes de performance du processus. Les analyses préliminaires des risques permettent d'identifier, d'évaluer et de hiérarchiser les modes de défaillances liés au produit, au processus ou à l'équipement de fabrication.

Soit Λ l'ensemble des modes de défaillances qui peuvent affecter une des opérations de procédé et $\lambda_j \in \Lambda$ le $j^{\text{ème}}$ mode de défaillance avec $j \in \{1, \dots, J\}$. Quelque soit son origine (machine, méthode, main d'oeuvre, matière ou milieu), un mode défaillance parmi cet ensemble va impacter au moins une caractéristique qualité liée à l'exécution d'une opération de fabrication donnée. Cela veut dire qu'une opération est considérée défaillante lorsqu'elle est exécutée en présence de tout mode de défaillance lié au produit, au processus ou à l'équipement.

D'autre part, si une opération est affectée par un mode de défaillance donné, le produit concerné est considéré perdu même si les autres opérations du même produit n'ont pas été impactées. Pour cela, nous définissons pour chaque opération OP_i un ensemble de modes de défaillances, qui peuvent l'impacter, noté $\Lambda^i \subset \Lambda$ et définie par :

$$\Lambda^i = \{\lambda_j | \delta_{(i,j)} = 1; j = 1, \dots, J\} \quad (5.10)$$

avec

$$\delta_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'opération de procédé } OP_i \text{ est impactée par la présence} \\ & \text{du mode de défaillance } \lambda_j ; \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

Ces éléments sont représentés dans la matrice d'impactabilité Δ . La matrice de probabilités $PROB$ indique pour chaque mode de défaillance λ_j la probabilité, notée $Pr_{(z,j)}$, de son occurrence à un instant t où l'outil de fabrication PT_z est entrain de processor une opération quelconque. Cette probabilité ($Pr_{z,j}$) est nulle au moment où l'outil z est entrain d'exécuter une opération OP_i qui n'est pas impactable par le mode de défaillance concerné ($\delta_{(i,j)} = 0$).

$$\Delta = \begin{array}{ccccc} \lambda_1 & \dots & \lambda_j & \dots & \lambda_J \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \left[\begin{array}{ccccc} \delta_{(1,1)} & \dots & \delta_{(1,j)} & \dots & \delta_{(1,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{(i,1)} & \dots & \delta_{(i,j)} & \dots & \delta_{(i,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{(I,1)} & \dots & \delta_{(I,j)} & \dots & \delta_{(I,J)} \end{array} \right] & \begin{array}{l} \leftarrow OP_1 \\ \vdots \\ \leftarrow OP_i \\ \vdots \\ \leftarrow OP_I \end{array} \end{array} \quad (5.11)$$

$$PROB = \begin{array}{ccccc} \lambda_1 & \dots & \lambda_j & \dots & \lambda_J \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \left[\begin{array}{ccccc} Pr_{(1,1)} & \dots & Pr_{(1,j)} & \dots & Pr_{(1,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Pr_{(z,1)} & \dots & Pr_{(z,j)} & \dots & Pr_{(z,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Pr_{(Z,1)} & \dots & Pr_{(Z,j)} & \dots & Pr_{(Z,J)} \end{array} \right] & \begin{array}{l} \leftarrow PT_1 \\ \vdots \\ \leftarrow PT_z \\ \vdots \\ \leftarrow PT_Z \end{array} \end{array} \quad (5.12)$$

2.4 Modèle de surveillance

L'objectif de la surveillance est de détecter l'occurrence des modes de défaillance après l'exécution d'une opération de procédé afin d'y remédier par une action corrective. La détection est le résultat d'une (ou d'une suite d') observation(s) apportée(s) par les mesures.

2.4.1 L'observabilité

Au delà de toute confusion avec la théorie des systèmes dynamiques, définissons l'observabilité d'un mode de défaillance λ_j , noté $\sigma_{(i,m)}^j$, comme étant la possibilité ou non de détecter son instantiation grâce à l'opération de mesure OM_i alors qu'il a été initié à l'opération de procédé OP_i . Cette observabilité sous forme binaire (1 si observable ; 0 sinon) est fonction des liens de précédence entre les opérations de procédé et celles de mesure et de facteur d'impactabilité des opérations de procédé par le mode de défaillance concerné :

$$\sigma_{(i,m)}^j = \delta_{i,j} \times pre_{(i,m)} \quad \forall j \in \Lambda \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (5.13)$$

$$\mathcal{O}^j = \begin{array}{c} \text{Opération de mesure où la} \\ \text{défaillance peut être détectée} \\ \hline OM_1 \quad \dots \quad OM_m \quad \dots \quad OM_M \\ \downarrow \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow \\ \left[\begin{array}{ccccc} \sigma_{(1,1)}^j & \dots & \sigma_{(1,m)}^j & \dots & \sigma_{(1,M)}^j \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{(i,1)}^j & \dots & \sigma_{(i,m)}^j & \dots & \sigma_{(i,M)}^j \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{(I,1)}^j & \dots & \sigma_{(I,m)}^j & \dots & \sigma_{(I,M)}^j \end{array} \right] \left. \begin{array}{l} \leftarrow OP_1 \\ \vdots \\ \leftarrow OP_i \\ \vdots \\ \leftarrow OP_I \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Opérations de} \\ \text{procédé où la} \\ \text{défaillance peut} \\ \text{arriver} \end{array} \end{array} \quad (5.14)$$

2.4.2 La détectabilité

Un plan de surveillance « optimal » est celui qui a le plus de chance à détecter, au plus tôt, les défaillances susceptibles d'impacter l'exécution des opérations de production. Le caractère aléatoire de la détection provient de plusieurs éléments liés à l'instant et l'endroit d'occurrence de la défaillance et de la fiabilité des moyens de détection employés. Soient \mathcal{A} et \mathcal{B} deux matrices qui caracté-

risent cette fiabilité par des probabilités liées au risque de ne pas détecter une défaillance alors qu'elle existe réellement et au risque d'une détection erronée d'une défaillance qui n'a pas réellement apparu. Les éléments de ces matrices sont, respectivement, définis par :

$a_{(L,j)} = \Pr(\text{l'outil de mesure } MT_l \text{ ne détecte pas le mode de défaillance } \lambda_j \text{ sachant qu'il est réellement apparu})$

$b_{(L,j)} = \Pr(\text{l'outil de mesure } MT_l \text{ détecte le mode de défaillance } \lambda_j \text{ sachant qu'il n'est pas réellement apparu})$

$$\mathcal{A} = \begin{array}{ccccc} \lambda_1 & \dots & \lambda_j & \dots & \lambda_J \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \left[\begin{array}{ccccc} a_{(1,1)} & \dots & a_{(1,j)} & \dots & a_{(1,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(l,1)} & \dots & a_{(l,j)} & \dots & a_{(l,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(L,1)} & \dots & a_{(L,j)} & \dots & a_{(L,J)} \end{array} \right] & \begin{array}{l} \leftarrow MT_1 \\ \vdots \\ \leftarrow MT_l \\ \vdots \\ \leftarrow MT_L \end{array} \end{array} \quad (5.15)$$

$$\mathcal{B} = \begin{array}{ccccc} \lambda_1 & \dots & \lambda_j & \dots & \lambda_J \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \left[\begin{array}{ccccc} b_{(1,1)} & \dots & b_{(1,j)} & \dots & b_{(1,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{(l,1)} & \dots & b_{(l,j)} & \dots & b_{(l,J)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{(L,1)} & \dots & b_{(L,j)} & \dots & b_{(L,J)} \end{array} \right] & \begin{array}{l} \leftarrow MT_1 \\ \vdots \\ \leftarrow MT_l \\ \vdots \\ \leftarrow MT_L \end{array} \end{array} \quad (5.16)$$

Si nous supposons que le système est dans un état stationnaire, où les différentes probabilités sont constantes durant l'horizon de planification considéré, nous pouvons exprimer la détectabilité d'un mode de défaillance à l'issue d'une opération de mesure par :

$d_{(j,i,m)} = \Pr(\text{détecter } \lambda_j \text{ grâce à l'opération de mesure } OM_m, \text{ sachant qu'il est apparu à l'opération de procédé } OP_i)$

$$d_{(j,i,m)} = \sigma_{(i,m)}^j \times (1 - a_{(l,j)}) \times pr_{(i,j)} \quad (5.17)$$

Avec

$pr_{(i,j)} \in [0, 1]$ la probabilité que l'opération OP_i soit exécutée en présence du mode de défaillance λ_j . Cette probabilité dépend de l'outil de fabrication sur lequel l'opération va être exécutée. Comme cette dernière information n'est pas connue

à ce stade, le plus prudent est de s'aligner sur la plus grande des probabilité d'occurrence de λ_j parmi tous les outils qualifiés à exécuter OP_i , c'est-à-dire :

$$pr_{(i,j)} = \max_{z \in \mathcal{Z}^i} Pr_{(z,j)} \quad (5.18)$$

2.4.3 Plan de surveillance

La conception du plan de surveillance consiste à définir les opérations de mesure à effectuer, et avec quels outils, durant l'horizon de planification pour optimiser un objectif déterminé. Les variables de décision correspondantes sont définies par :

$$x_{m,l}^{k_m} = \begin{cases} 1 & \text{si le } k_m^{\text{ième}} \text{ produit contenant l'opération de mesure } OM_m \\ & \text{dans son modèle de flux est mesuré sur l'outil de mesure } \\ & MT_l; \\ 0 & \text{Si non.} \end{cases} \quad (5.19)$$

Avec ces variables de décision, nous pouvons définir un plan de surveillance partiel de chacune des opérations de mesure par la matrice suivante :

$$X_m = \begin{bmatrix} x_{(m,1)}^1 & \dots & x_{(m,l)}^1 & \dots & x_{(m,L)}^1 \\ x_{(m,1)}^2 & \dots & x_{(m,l)}^2 & \dots & x_{(m,L)}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(m,1)}^{k_m} & \dots & x_{(m,l)}^{k_m} & \dots & x_{(m,L)}^{k_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(m,1)}^{K_m} & \dots & x_{(m,l)}^{K_m} & \dots & x_{(m,L)}^{K_m} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Avec

$K_m = Q_{p^m}$: la quantité à fabriquer du produit contenant l'opération de mesure OM_m dans processus ;

$$p^m = \arg \min_{p'=1, \dots, P} \sum_{p''=1}^{p'} M^{p''} \geq m \quad (5.21)$$

La plan de surveillance global est ainsi constitué de M plans de surveillance partiels des différents opérations de mesure (voir Figure 5.2).

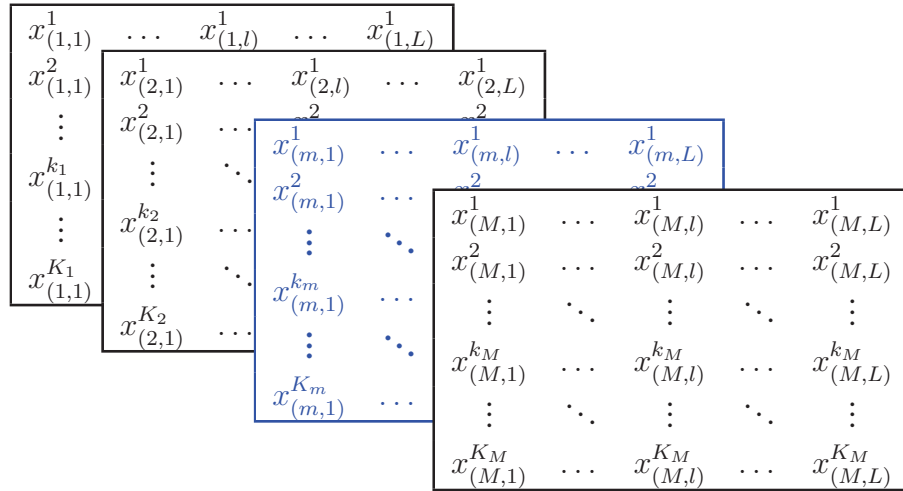


FIGURE 5.2 – Les variables de décision du plan de surveillance global

3 Un modèle générique du MAR

Nous présentons dans cette section un modèle générique de caractérisation du MAR d'un outil de fabrication sujet à des modes de défaillance dont le contrôle est effectué selon un plan de surveillance prédéfini. En effet, le but est de pouvoir évaluer l'effet prévisionnel, en terme de risque (MAR), d'un plan de surveillance donné et ainsi songer à définir le meilleur plan de surveillance qui optimise le MAR global du processus pendant un horizon de planification donné. Le MAR global représente le risque global, en terme de pertes de produits, relatif à l'ensemble des outils de fabrication et à l'ensemble de modes de défaillance possibles. Le calcul du MAR global du processus nécessite de normaliser et d'agréger des fonctions MAR génériques dont chacune est relative à un outil et un mode de défaillance.

À chaque mode de défaillance $\lambda \in \Lambda$, pouvant impacter les opérations exécutées sur un outil de fabrication quelconque, correspond un MAR propre à l'outil noté MAR_z^λ qui évolue selon le modèle générique présenté dans Figure 5.3. Dans ce modèle n contrôles sont planifiés sur le processus durant l'horizon de planification H_z exprimé en nombre de produits opérés selon leur ordre de passage. les autre paramètres du modèle sont expliqués dans les paragraphes qui suivent.

3.1 Taux d'accroissement du risque

Le taux d'accroissement du risque reflète la probabilité d'occurrence d'un mode de défaillance donné sur un outil donné. α_i représente la valeur de ce taux, sup-

posé constant, entre les dates effectives du $(i - 1)^{\text{ième}}$ et du $(i)^{\text{ième}}$ contrôles effectués sur l'outil. La variation de ce taux d'une période à une autre peut être due à l'une des causes suivantes : 1) lors du précédent contrôle, une défaillance est détectée, ce qui a amené à faire une action corrective sur la machine ; 2) aucune défaillance n'a été détectée, mais l'information apportée par la mesure permet d'ajuster sa probabilité d'occurrence.

3.2 Délai de contrôle

Le délai de contrôle τ_i représente le temps passé entre l'instant où le contrôle est initié et l'instant où le contrôle est terminé. Ce délais est important dans la notion du MAR car si l'outil de fabrication continu à produire pendant ce temps, le contrôle en question ne permet pas de lever l'incertitude sur les produits opérés sur cet outil pendant cette période de temps. Ce délais dépend du type de mesure employée (enligne, hors ligne, intégrée ou sur la machine, voir Chap. 2. § 5) et est généralement composé de plusieurs temps aléatoire tel que le temps de transfert du produit à mesurer vers l'outil de mesure, le temps d'attente devant l'outil de mesure, le temps de mesure, le temps d'analyse de données de mesure et le temps de mise en place de l'action corrective si les données révèlent une défaillance.

3.3 Effet de contrôle

Lorsqu'un contrôle est effectué sur un outil de fabrication, le MAR est réduit d'une quantité proportionnelle à sa valeur au moment où le contrôle est initié. En effet, l'information apportée par la mesure permet de lever l'incertitude sur la qualité de l'exécution des opérations de fabrication pour un nombre limité des produits opérés. Ce dernier n'est en aucun cas supérieur au nombre de produit opérés entre le précédent contrôle et le moment où le contrôle actuel est initié. Le taux de réduction du MAR lors du $i^{\text{-ème}}$ contrôle, noté $0 \leq \rho_i \leq 1$, dépend de l'outil de mesure utilisé pour prélever la mesure qui apporte l'information sur l'état du processus. La réduction du MAR à l'issue du $i^{\text{-ème}}$ contrôle est notée Δ_i qui exprimé par la formule suivante :

$$\Delta_i = \rho_i \times MAR(t_i) = \rho_i \times (MAR(t_i + \tau_i) - \alpha_{i-1}\tau_i) \quad (5.22)$$

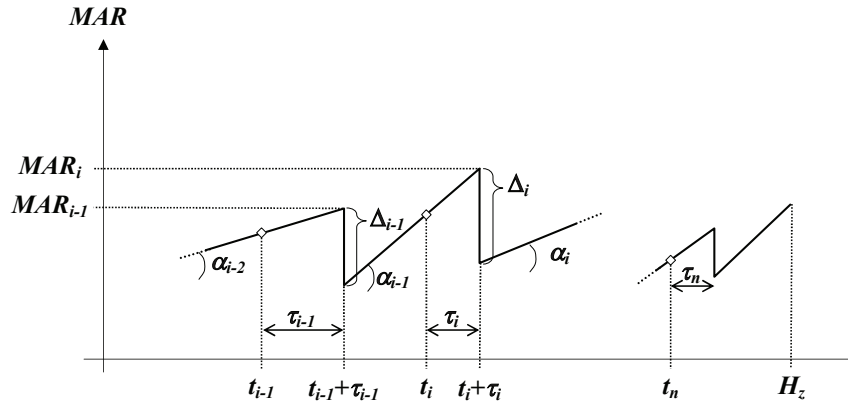


FIGURE 5.3 – Modèle générique du MAR

3.4 Caractérisation du MAR générique

L'évolution du MAR tel que modélisée dans Figure 5.3 représente certaines caractéristiques pour faciliter son exploitation dans la conception d'un plan de surveillance généralisé basé sur le risque. Comme cette approche assurantielle se base sur la maîtrise de l'exposition au risque opérationnel, les valeurs des pics du MAR sont particulièrement importants. Ces derniers correspondent aux instants où les contrôles sont accomplis et sont notés MAR_i telque :

$$MAR_i = MAR(t_i + \tau_i) \quad \forall i \in 1, \dots, n \quad (5.23)$$

Ce modèle de MAR est caractérisé par les deux propriétés suivantes :

Propriété 3.

Pour tout plan de surveillance X , pour tout outil de fabrication z et pour tout mode de défaillance λ , les valeurs des pics du MAR correspondant peuvent être exprimées par l'expression récursive suivante :

$$MAR_i = MAR_{i-1} \times (1 - \rho_{i-1}) + \rho_{i-1} \alpha_{i-2} \tau_{i-1} + \alpha_{i-1} \Delta t_i \quad (5.24)$$

Avec

$$\Delta t_i = (t_i + \tau_i - (t_{i-1} + \tau_{i-1})), \rho_0 = 1, \tau_0 = 0, t_0 = 0 \text{ et } t_{n+1} = H_z$$

Preuve 3. Voir Annexe C

Propriété 4.

Un plan de surveillance X^* visant à minimiser l'exposition aux risques est optimal si et seulement si les valeurs des pics du MAR résultant sont égaux pour chacun des outils de fabrication. C'est-à-dire :

$$MAR_i^* = Cte \quad \forall i \in \{1, \dots, n+1\} \quad (5.25)$$

Preuve 4. Voir Annexe C

Si l'objectif est de minimiser l'exposition aux risques en minimisant les pics du MAR sur chaque machine pour tout mode de défaillance, les propriétés 3 et 4 permettent de caractériser les valeurs optimales des pics du MAR correspondants aux instants de contrôle sur chaque outil de fabrication et pour tout mode de défaillance λ_{j_z} appartenant à l'ensemble $\{\lambda_{j'} \mid \delta_{(i,j')} \times qpt_{(i,z)} = 1; i \in \mathcal{I}; j' \in \Lambda\}$:

$$MAR_{(z,i_z,j_z)}^* = \frac{\pi_{(i_z-1,j_z)} + \alpha_{(i_z-1,j_z)} \times \Delta t_{i_z}}{\rho_{(i_z-1,j_z)}} = Cte_{(z,j_z)} \quad (5.26)$$

Avec

$$\pi_{(i_z-1,j_z)} = \tau_{(i_z-1)} \rho_{(i_z-1,j_z)} \alpha_{(i_z-2,j_z)} ;$$

$$\Delta t_{i_z} = (t_{i_z}^* + \tau_{i_z} - t_{i_z-1}^* - \tau_{i_z-1}) ;$$

$$t_{0_z}^* = 0 ;$$

$$MAR^*((z, 0_z, j_z)) = 0 ;$$

et

$$MAR_{(z,1_z,j_z)}^* = \alpha_{(0_z,j_z)} (t_{1_z}^* + \tau_{1_z}).$$

Cette expression signifie que dans un plan de surveillance optimal, le niveau d'exposition au risque opérationnel lié à chaque mode de défaillance, susceptible d'arriver sur un outil de fabrication, est constant durant l'horizon de planification. Ce niveau est représenté par les pics du MAR qui sont constants sur chaque outil de fabrication et pour chacun des modes de défaillance.

Le niveau d'exposition minimal garanti par le plan de surveillance optimal dépend du nombre de contrôles planifiés imputés à l'outil de fabrication considéré et des caractéristiques des outils de contrôle choisis (ρ , τ et α) qui conditionnent d'évolution du MAR pour chacun des modes de défaillance.

Le corollaire suivant permet de caractériser par une formule récursive le lien

entre les dates de contrôles optimaux sur un outil de fabrication donné lorsque le nombre de contrôle et les outils de contrôles à utiliser sont fixés.

Corollaire 1.

Dans un plan de surveillance optimal, les dates optimales de contrôle sont définies par :

$$\begin{aligned}
 t_{i_z}^* = & t_{1_z}^* \left(1 + \alpha_{(0_z, j_z)} \sum_{i'_z=1}^{i_z-1} \frac{\rho(i'_z, j_z)}{\alpha(i'_z, j_z)} \right) - \sum_{i'_z=1}^{i_z-1} \frac{1}{\alpha(i'_z, j_z)} \left(\pi_{(i'_z, j_z)} + \alpha_{(i'_z, j_z)} \Delta \tau_{(i'_z+1, j_z)} \right) \\
 & + \alpha_{(0_z, j_z)} \tau_{(1_z, j_z)} \sum_{i'_z=1}^{i_z-1} \frac{\rho(i'_z, j_z)}{\alpha(i'_z, j_z)} \\
 & \forall i_z \in \{1, \dots, n_z + 1\} \forall j_z \in \{j \mid \delta_{(i, j)} \times qpt_{(i, z)} = 1; i \in \mathcal{I}; j \in \Lambda \}
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

Avec

$$\pi_{(i'_z, j_z)} = \tau_{i'_z} \rho(i'_z, j_z) \alpha_{(i'_z-1, j_z)}$$

$$\Delta \tau_{(i'_z+1, j_z)} = \tau_{(i'_z+1, j_z)} - \tau_{(i'_z, j_z)}$$

n_z : nombre de contrôle planifiés imputés à l'outil de fabrication z , c'est le nombre total de contrôles effectuées sur des produits procédés par l'outil z .

Preuve 5. Voir Annexe C

Le corollaire 1 permet de déduire l'expression de la valeur optimale de pic du MAR :

Corollaire 2.

Dans un plan de surveillance optimal, le niveau maximal d'exposition au risque j_z d'un outil de fabrication z est égal à :

$$\begin{aligned}
 MAR_{max, z, j_z}^* = & \alpha_{(0_z, j_z)} \left(\frac{H_z + \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{1}{\alpha_{(i_z, j_z)}} \left(\pi_{(i_z, j_z)} + \alpha_{(i_z, j_z)} \Delta \tau_{(i_z+1, j_z)} \right) - \alpha_{(0_z, j_z)} \tau_{(1_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho(i_z, j_z)}{\alpha_{(i_z, j_z)}}}{\left(1 + \alpha_{(0_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho(i_z, j_z)}{\alpha_{(i_z, j_z)}} \right)} + \tau_{(1_z, j_z)} \right)
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

Preuve 6. Voir Annexe C

4 Conception du plan de surveillance généralisé

La conception d'un plan de surveillance généralisé basé sur le risque doit tenir compte à la fois de la formalisation généralisée et du modèle générique du MAR. Pour cela, il est nécessaire de définir les variables de décision adéquates, les contraintes ainsi que la fonction objectif à optimiser. Dans ce qui suit nous présentons quelques formalisations permettant de résoudre le problème de conception de plan de surveillance dans différents cas correspondants à des objectifs différents.

4.1 Minimiser la charge de contrôle en maîtrisant le niveau d'exposition aux risques

L'objectif serait de trouver le meilleur plan de surveillance qui utilise le juste nécessaire de ressources de contrôle pour garantir que les risques sont maîtrisés. Si nous supposons que le taux d'accroissement du risque relatif à un mode de défaillance donné est constant durant l'horizon de planification pour chacun des outils de fabrication, les variables régissant l'évolution du MAR peuvent être formalisées comme suit :

$$\begin{aligned}
 y_{(i_z, l)} &= \begin{cases} 1 & \text{Si l'outil de contrôle } l \text{ est utilisé au } i_z^{\text{ème}} \text{ contrôle de l'outil de} \\ & \text{fabrication } z \in \mathcal{Z} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \\
 w_{(h_z, l)} &= \begin{cases} 1 & \text{Si l'outil de contrôle } l \text{ est utilisé pour contrôler le } h_z^{\text{ème}} \text{ produit} \\ & \text{processé par l'outil de fabrication } z \in \mathcal{Z} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \\
 \alpha_{(i_z, j_z)} &= \alpha_{j_z} & \forall i_z \in \{1, \dots, n_z\} \forall z \in \mathcal{Z} \\
 \rho_{(i_z, j_z)} &= \sum_{l=1}^L y_{(i_z, l)} \times \rho_{(l, j_z)} & \forall i_z \in \{1, \dots, n_z\} \forall z \in \mathcal{Z} \\
 \tau_{(i_z, j_z)} &= \sum_{l=1}^L y_{(i_z, l)} \times \tau_{(l, j_z)} & \forall i_z \in \{1, \dots, n_z\} \forall z \in \mathcal{Z} \\
 n_z &= \sum_{\substack{i=1 \\ qpt_{(i, z)} > 0}}^I \sum_{\substack{m=1 \\ pre_{(i, m)} = 1}}^M \mathcal{DLSP}_{(i, z)} \sum_{k_m=1}^{K_m} \sum_{\substack{l=1 \\ qmt_{(m, l)} > 0}}^L x_{(m, l)}^{k_m} & \forall z \in \mathcal{Z} \\
 &= \sum_{h_z=1}^{H_z} \sum_{l=1}^L w_{(h_z, l)} \\
 H_z &= \sum_{i=1}^I \mathcal{DLSP}_{(i, z)} \times K_i & \forall z \in \mathcal{Z}
 \end{aligned}$$

Si nous définissons une limite d'exposition aux risques propre à chacun des outils de fabrication R_{L_z} à ne pas dépasser durant l'horizon de planification, cette première variante de problème de conception de plan de surveillance généralisé (PCPS1) peut être formalisée comme suit :

$$(PCPS1) \text{ Minimiser } \sum_{m=1}^M \sum_{k_m=1}^{K_m} \sum_{l=1}^L x_{(m,l)}^{k_m} \times C t_{(m,l)}$$

Sous les contraintes

$$(C1.1) x_{(m,l)}^{k_m} = 0 \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \forall l \in \{1, \dots, L\} \forall k_m \in \{1, \dots, K_m\} | qmt_{(m,l)} = 0$$

$$(C1.2) \sum_{l=1}^L x_{(m,l)}^{k_m} \leq 1 \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \forall k_m \in \{1, \dots, K_m\}$$

$$(C1.3) \sum_{m=1}^M \sum_{k_m=1}^{K_m} x_{(m,l)}^{k_m} \times C t_{m,l} \leq CAPA_l \quad \forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$$(C1.4) y_{(i_z,l)} = w_{(h_z(i_z),l)} \quad \forall i_z \in \{1, \dots, n_z\} \quad \forall z \in \mathcal{Z} \quad \forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$$h_z(i_z) = \arg \min_{h'_z=1, \dots, H_z} \sum_{h''_z=1}^{h'_z} \sum_{l=1}^L w_{(h''_z,l)} - i_z \geq 0$$

$$(C1.5) \sum_{i_z=1}^{n_z} y_{(i_z,l)} = \sum_{h_z=1}^{H_z} w_{(h_z,l)} \quad \forall z \in \mathcal{Z} \quad \forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$$(C1.6) \sum_{l=1}^L y_{(i_z,l)} = 1 \quad \forall i_z \in \{1, \dots, n_z\}$$

$$(C1.7) \sum_{l=1}^L w_{(h_z,l)} = 1 \quad \forall h_z \in \{1, \dots, H_z\}$$

$$(C1.8) \sum_{h_z=1}^{H_z} \sum_{l=1}^L w_{(h_z,l)} = \sum_{\substack{i=1 \\ \mathcal{Z}^i \supset z}}^I \sum_{k_m=1}^{K_i} DISP_{(i,z)} \sum_{\substack{m=1 \\ pre_{(i,m)}=1}}^M \sum_{\substack{l=1 \\ qmt_{(m,l)} > 0}}^L x_{(m,l)}^{k_m} \quad \forall z \in \mathcal{Z}$$

$$(C1.9) \sum_{i_z=1}^{n_z} \sum_{l=1}^L y_{(i_z,l)} \rho_{(l,j_z)} (R_{L_z} - \alpha_{j_z} \tau_{(l,j_z)}) \geq \alpha_{j_z} \times H_z - R_{L_z} \quad \forall z \in \mathcal{Z}; \forall j_z \in \bigcup_{\substack{i=1, \dots, I \\ \mathcal{Z}^i \supset z}} \Lambda^i$$

Dans cette formalisation sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers, les variables de décision sont les variables binaires $x_{(m,l)}^{k_m}$. Les variables $y_{(i_z,l)}$ et $w_{(h_z,l)}$ sont des variables intermédiaires qui sont utilisées pour intégrer la contrainte sur les limites d'exposition aux risques à travers le modèle générique du MAR. Les contraintes (C1.1) à (C1.3) sont définies pour assurer l'intégrité et la faisabilité du plan de surveillance. Le lien entre plan de surveillance et modèle du MAR est assuré par les contraintes (C1.4) à (C1.8) à travers la définition des

variables intermédiaires. La maîtrise de l'exposition aux risques, en imposant un niveau de MAR contraint à être inférieur à une limite prédéfinie pour chaque outil de fabrication, est obtenue par la contrainte (C1.9) qui doit être vérifiée pour chacun des modes de défaillance susceptibles d'impacter chacun des outils de fabrication.

4.2 Maximiser l'efficacité globale du plan de surveillance en maîtrisant le niveau d'exposition aux risques

Dans certains cas, l'objectif pourrait être de trouver un plan de surveillance qui maximise un critère d'efficacité qui caractérise chaque contrôle effectué tout en garantissant un certain niveau d'exposition aux risques. La notion d'efficacité de contrôle peut être un simple critère, ou l'agrégation de plusieurs critères, qui qualifient l'intérêt de faire un contrôle donné sur un outil de fabrication donné vis-à-vis un objectif de performance opérationnelle, organisationnelle ou autre. Si on définit un critère de performance de contrôle pour chacune des opérations de mesure OM_m noté C_m et une limite d'exposition aux risques pour chaque outil de fabrication, le problème de conception d'un plan de surveillance peut être formalisé comme suit :

$$(PCPS2) \text{ Maximiser } \sum_{m=1}^M \sum_{k_m=1}^{K_m} C_m \times \sum_{l=1}^L x_{(m,l)}^{k_m}$$

Cela signifie que l'on cherche à allouer les contrôles $(x_{(m,l)}^{k_m})$ de telle manière à maximiser la l'efficacité globale qui est la somme des critères de performance des opérations de mesure choisies. Les contraintes permettant de vérifier la faisabilité et de maîtriser le niveau d'exposition aux risques sont les mêmes que celle de la formalisation du problème (PCPS1).

Remarque 4. Cette formalisation est une généralisation de la formalisation utilisée dans **Chapitre 3** dans laquelle un seul mode de défaillance est surveillé et les paramètres régissant l'évolution du MAR sont constants, avec :

$$\alpha_{(i_z, j_z)} = 1, \rho_{(i_z, j_z)} = 1 \text{ et } \tau_{(i_z, j_z)} = 0 \quad \forall i_z \quad \forall j_z$$

4.3 Maximiser la détectabilité globale des modes de défaillance

Cette formalisation concerne l'objectif de maximiser la chance de détecter les défaillances qui risquent de venir perturber les performances du système de production. Cet objectif peut être temporaire et limité à une phase de stabilisation de système de production dans laquelle on vise à détecter et corriger le plus

grand nombre de modes de défaillance avant d'entrer dans une phase où, le système étant stabilisé, on cherchera plutôt à optimiser les performances opérationnelles du système de production. La notion de détectabilité a été introduite dans § 2.4.2 comme étant la probabilité qu'un mode de défaillance donné soit détecté par une opération de mesure donnée si la défaillance est initiée à l'exécution d'une opération de procédé donnée : $d_{(j,i,m)} = \Pr(\text{détecter } \lambda_j \text{ grâce à l'opération de mesure } OM_m, \text{ sachant qu'il est apparu à l'opération de procédé } OP_i)$
 $d_{(j,i,m)} = o_{(i,m)}^j \times (1 - a_{(l,j)}) \times pr_{(i,j)}$

Avec

$pr_{(i,j)} = Pr_{(z(i),j)} \in [0, 1]$: la probabilité que l'opération OP_i soit opérée en présence du mode de défaillance λ_j , avec $z(i)$ indice de l'outil de fabrication où l'opération de procédé OP_i est exécutée.

Dans ce cas, la fonction objectif correspondante peut être formalisée comme suit :

$$(PCPS3) \text{ Maximiser } \sum_{z \in \mathcal{Z}} \sum_{\substack{i=1 \\ \mathcal{Z}^i \supset z}}^I \sum_{\substack{j \in \Lambda^i \\ pre_{(i,m)}=1}}^M \sum_{k_m=1}^{K_m} \sum_{l=1}^L x_{(m,l)}^{k_m} \times o_{(i,m)}^j \times (1 - a_{(l,j)}) \times Pr_{(z,j)}$$

La fonction objectif permet de quantifier la somme des valeurs de détectabilité relatives aux opérations de mesure choisies ($x_{(m,l)}^{k_m} = 1$). Pour cela, il faut parcourir pour chacun des les outils de fabrications l'ensemble des opérations de procédé

qu'il est capable d'opérer ($\sum_{z \in \mathcal{Z}} \sum_{\substack{i=1 \\ \mathcal{Z}^i \supset z}}^I$). Pour chacune de ces dernière, on parcourt

tous les modes de défaillance susceptible de l'impacter et l'ensemble des opérations de mesure qui peuvent la contrôler ($\sum_{j \in \Lambda^i} \sum_{\substack{m=1 \\ pre_{(i,m)}=1}}^M$). Le choix des outils de

mesure et le nombre de fois où une opération de mesure donnée va être répétée

sont réalisés par les deux sommes $\sum_{k_m=1}^{K_m} \sum_{l=1}^L$.

Les contraintes restent les mêmes que dans (PCPS1) sauf s'il n'y a pas de contraintes liées à l'exposition aux risques des outils de fabrication, auquel cas les contraintes (C1.4) à (C1.9) sont inutiles.

5 Conclusion du chapitre 5

Ce chapitre présente une généralisation de la problématique de conception de plan de surveillance d'un processus caractérisé par une multitude de risques et de couches de protections.

En premier lieu, nous présentons une formalisation généralisée de plan de surveillance dans le cas d'un processus de fabrication complexe composé de plusieurs ressources de fabrication et de contrôles. Le modèle de flux de processus est composé de plusieurs opérations de fabrication et de mesure avec acheminement gouverné par des liens de précédence. Cette formalisation tient compte aussi des différents modes de défaillance qui présentent des risques opérationnels pouvant impacter l'exécution des opérations de fabrication. Ces risques sont contrôlés grâce aux informations apportées par les opérations de mesure définies dans le modèle de flux de processus. Ces étapes de mesure constituent des couches de protection sur plusieurs niveaux pendant l'évolution du processus de fabrication.

En second lieu, une formalisation générique de caractérisation de l'évolution du risque opérationnel est présentée à travers le MAR générique. Il s'agit d'un modèle qui intègre les performances des contrôles en termes de taux d'accroissement du risque, de taux de réduction du risque et de délai de contrôle. Quelques propriétés de ce modèle ont été identifiées et démontrées. Ces dernières permettent de caractériser l'optimalité d'un plan de surveillance quelconque vis-à-vis de certaines évolutions attendu du MAR.

Selon l'objectif attendu du plan de surveillance à concevoir, incluant ou pas un objectif lié à la maîtrise du MAR, quelques formalisations possibles ont été présentées. Le choix des méthodes de résolution des problèmes formalisées dans ce chapitre et leurs expérimentations présentent une perspective logique et fort intéressante.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le travail exposé dans ce mémoire de thèse avait comme objectif de trouver des approches nouvelles pour la conception des plans de surveillance de processus industriels complexes dont le contrôle, par différentes techniques, repose sur des sources d'information diverses et des ressources limitées de maîtrise. En effet, le problème rencontré avec les approches traditionnelles est que la mise en application du plan de surveillance est souvent mise à mal par les aléas inévitables liés aux flux physiques et informationnels. De plus, le processus de contrôle, qui est exécuté en concordance avec le plan de surveillance, interagit avec d'autres processus opérationnels qui sont gouvernés par des objectifs locaux qui peuvent être en contradiction avec l'objectif premier du plan de surveillance qui est la maîtrise des risques. L'industrie des semi-conducteurs, représentées par nos partenaires dans le cadre de cette thèse, est un exemple typique des secteurs concernés par cette problématique vue la complexité de leurs processus de fabrication et les fortes exigences de qualité des produits et de processus qui la caractérisent.

La revue de littérature, que nous avons présentée dans le deuxième chapitre, montre les limites des outils et des techniques utilisés pour assurer la fonction contrôle de processus lorsqu'ils sont conçus séparément, et souvent, en négligeant les contraintes des ressources limitées de contrôle. En plus, malgré les importantes avancées qui ont permis de perfectionner ces techniques, rares sont les travaux de recherche qui ont cherché une vision globale permettant l'intégration des activités de contrôle de processus et prenant en compte leurs interactions avec les autres activités opérationnelles afin de garantir des niveaux de performance globale optimisés.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté et expérimenté notre approche

assurantielle de conception de plan de surveillance permettant d'anticiper les aléas opérationnels des flux et de prendre en considération les caractéristiques des ressources de maîtrise disponibles. D'abord, un modèle simplifié basé sur cette approche a été détaillé et expliqué avec des exemples. Ce modèle se base sur la notion de Matériel À Risque (MAR) pour maîtriser l'exposition du système de production aux risques de pertes massives dues à une dérive ou une défaillance tardivement détectée. Le but était de définir un plan de surveillance qui limite les pertes potentielles des produits, fabriqués après défaillance, par la planification des contrôles systématiques à une fréquence minimale garantie. Une fois le niveau d'exposition au risque maîtrisé, la maximisation de l'efficacité des contrôles à planifier est assurée en allouant plus de capacité aux contrôles les plus efficaces. Ceci augmente encore plus la chance de détecter rapidement tout événement non désiré et pouvant mettre en péril le processus de fabrication. Ensuite, et comme le contrôle de processus en temps réel ne peut pratiquement pas être exécuté conformément au plan de surveillance cible, étant donné les aléas opérationnels, nous avons discuté certains paramètres permettant d'exécuter le plan de surveillance de façon réactive par rapport à l'évolution du contexte opérationnel. Ces paramètres reflètent les tolérances du plan de surveillance cible et permettent de contrôler le MAR dans une perspective assurantielle lorsqu'ils sont associés à des décisions opérationnelles concernant la gestion des opérations de fabrication et des opération de contrôle. En outre, le coût élevé de fabrication d'une plaquette signifie que la réduction de l'exposition aux risques peut apporter des gains importants (en Million \$) sur le coût d'assurance qui sert pour couvrir les perte potentielles et indemniser les clients lorsqu'ils sont impactés d'une façon ou d'une autre.

Pour évaluer l'apport de notre approche, des expérimentations mettant en évidence les aléas et les contraintes opérationnelles de contrôle de processus dans des conditions réelles ont été menées et présentées dans le chapitre 4. Ces expérimentations se basent sur un cas industriel en utilisant des données historiques réelles fournies par notre partenaire fabricant de semi-conducteurs. L'approche d'expérimentation se base sur la simulation par reconstitution de l'exécution des opérations de contrôle avec un nouveau scénario dans lequel la stratégie de contrôle de processus est conforme au plan de surveillance cible et aux paramètres de contrôle du MAR calculés par notre approche. La méthode de simulation et ses limites ont été présentées et discutées. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de notre approche de planification de surveillance dans le contrôle du risque opérationnel. En effet, une planification rationnelle basée sur la maîtrise du MAR et intégrant les caractéristiques des flux et des ressources semble être

une approche robuste pour maîtriser les risques opérationnels. Nous pensons que cette activité de planification est nécessaire mais non suffisante car la maîtrise des risques opérationnels basée sur le contrôle de MAR est fortement influencée par les décisions opérationnelles de contrôle des flux physiques dans l'usine. Il est donc nécessaire d'intégrer dans ces décisions des objectifs et des contraintes tenables en termes de MAR.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous présentons une formalisation généralisée de notre approche de conception de plan de surveillance. Cette généralisation concerne le cas d'un processus de fabrication complexe composé de plusieurs ressources de fabrication et de contrôles et qui est assujéti à des sources multiples de risque opérationnel. Dans cette formalisation, le modèle de flux de processus est composé de plusieurs opérations de fabrication et de mesure dont l'acheminement est gouverné par des liens de précédence entre les opérations de fabrication elles mêmes et entre ces dernières et les opérations de contrôle. Cette formalisation tient compte aussi des différents modes de défaillances qui présentent des sources de risque opérationnel pouvant impacter l'exécution des opérations de fabrication et donc dégrader les performances du processus. Ces risques sont contrôlés grâce aux opérations de mesure définies dans le modèle de flux de processus qui constituent des couches de protection sur plusieurs niveaux pendant l'évolution du processus de fabrication. Par la suite, une formalisation générique de caractérisation de l'évolution du risque opérationnel est présentée à travers le MAR générique. Il s'agit d'un modèle qui intègre les performances des contrôles en termes de taux d'accroissement du risque, de taux de réduction du risque et de délai de contrôle. Quelques propriétés génériques du MAR ont été identifiées et démontrées. Ces dernières permettent de vérifier la faisabilité et l'optimalité d'un plan de surveillance quelconque vis-à-vis de certains objectifs liés à la maîtrise du MAR. Selon l'objectif attendu du plan de surveillance à concevoir, incluant ou pas des objectifs liés à la maîtrise du MAR, quelques formalisations possibles ont été présentées.

Perspectives

Les premiers résultats, obtenus suite aux réflexions menées dans le cadre de cette thèse, sont prometteurs quant à l'intérêt de l'approche que nous proposons pour une meilleure maîtrise des risques qui soit en adéquation avec les spécificités du système de production et de sa dynamique. En outre, ce travail présente quelques perspectives qui peuvent venir compléter et/ou améliorer notre approche :

- **Étendre l'application :**

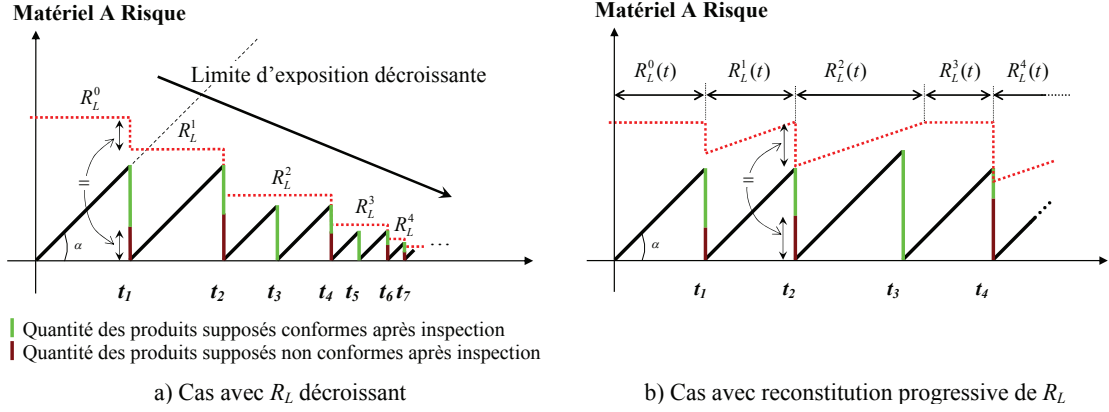
Une première perspective concerne l'application de notre approche dans d'autres secteurs industriels et d'autres domaines qui peuvent être concernés par des problématiques similaires. En effet, la problématique de planification des activités de contrôle des processus avec des ressources limitées est présente dans beaucoup d'autres secteurs industriels. Par exemple, nous pouvons citer l'industrie agroalimentaire et l'industrie pharmaceutique où le contrôle de la qualité des produits et leur traçabilité sont des enjeux sécuritaires majeurs donnant, en plus, une dimension sociétale à cette problématique. En outre, comme la notion de processus est aussi présente dans tous les domaines du monde social et économique, les risques opérationnels, sous différentes formes, sont omniprésents et nécessitent d'être contrôlés et maîtrisés.

– **Considérer une dynamique de la limite d'exposition aux risques :**

Cette piste d'amélioration est en relation avec la limite R_L , que nous avons supposé constante durant l'horizon de planification. En effet, R_L qui reflète la capacité de l'organisation à faire face aux perturbations engendrées par les défaillances potentielles, peut varier en fonction des résultats des précédents contrôles. Cette capacité de réaction est liée à un ensemble de ressources consacrées à cet effet qui sont des ressources finies dont la disponibilité n'est pas continue. On peut donc imaginer une limite R_L qui diminue au fur et à mesure que les résultats des vraies pertes sont connues (voir Figure 5.4. a)). Une autre façon d'introduire une dynamique sur la limite R_L consiste à considérer un temps de reconstitution de la capacité de réaction aux pertes après une perte effective constatée lors d'un contrôle (voir Figure 5.4. b)). Les verrous scientifiques auxquels il faut faire face lors de la prise en compte d'une telle dynamique de la limite R_L concernent la prévision des pertes à chaque instant de contrôle et sa précision ainsi que la formalisation du problème de décision qui en résulte. De plus, la méthode de résolution reste à définir vue la nature probabiliste qui risque de caractériser la fonction objectif et les contraintes associées à la limite d'exposition R_L .

– **Considérer une approche probabiliste du risque :**

Cette perspective est la suite d'une première réflexion que nous avons menée sur une approche stochastique pour le calcul du risque opérationnel ([Bettayeb et al., 2010a]). Dans cette approche, le risque est calculé en se basant sur la distribution de probabilité du mode de défaillance à surveiller, sur l'horizon considéré de planification, et sur une représentation conditionnelle des pertes potentielles en fonction du plan de surveillance à appliquer (Voir Figure 5.5). En effet, nous considérons une courbe d'évolution de pertes potentielles (PL) selon l'instant où le mode de défaillance risque d'arriver et selon

FIGURE 5.4 – Cas de R_L dynamique

les instant où les contrôles sont planifiés. L'effet du plan de surveillance est considéré seulement sur les pertes potentielles puisque nous supposons ici que lors d'un contrôle toutes les courbes des pertes potentielles sont remises à zéro. L'exemple de la Figure 5.5 illustre le cas d'un plan de surveillance X constitué d'un seul contrôle planifié au $i^{\text{ème}}$ produit fabriqué. Dans ce cas, les courbes des pertes potentielles correspondant à un instant d'arrivée de la défaillance antérieure à i sont remises à zéro à partir de l'instant i où le contrôle est planifié. À partir de cet instant seul les pertes potentielles correspondant à un instant d'arrivée de la défaillance postérieure à i sont considérées dans le calcul du risque. Dans ce cas, l'expression du risque pour un plan de surveillance quelconque est :

$$\begin{aligned}
 R^X(i) &= i \times Pr_1 + (i - 1) \times Pr_2 + \cdots + 1 \times Pr_i \\
 &= PL_1^X(i) \times Pr_1 + PL_2^X(i) \times Pr_2 + \cdots + PL_i^X(i) \times Pr_i \\
 &= \sum_{j=1}^i PL_j^X(i) \times Pr_j
 \end{aligned}$$

Avec la même distribution de probabilité d'arrivée de la défaillance sur l'horizon de planification, différents plans de surveillance ont des différents impacts sur l'évolution des pertes potentielles et ainsi ils correspondent à des différentes évolutions du risque. L'enjeu est de trouver une méthode d'optimisation analytique ou par simulation permettant d'obtenir le meilleur plan de surveillance vis-à-vis d'un objectif lié à la maîtrise du risque.

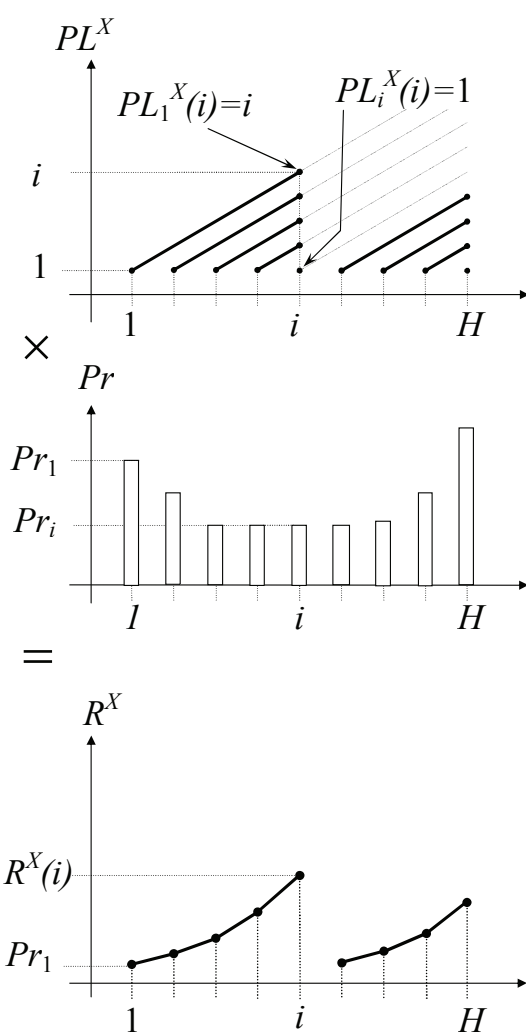


FIGURE 5.5 – Approche stochastique pour le calcul de risque opérationnel

Bibliographie

- [Abdel-Hameed, 1987] Abdel-Hameed, M. (1987). Inspection and maintenance policies of devices subject to deterioration. *Advances in Applied Probability*, pages 917–931.
- [Abdel-Hameed, 2004] Abdel-Hameed, M. S. (2004). Optimal predictive maintenance policies for a deteriorating system : The total discounted cost and the long-run average cost cases. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 33(3) : 735–745.
- [AFNOR, 1992] AFNOR (1992). Norme AFNOR X06-030 : Guide de la mise en place de la maîtrise statistique des processus. *Association Française de Normalisation*.
- [Anis, 2008] Anis, M. Z. (2008). Basic process capability indices : An expository review. *International Statistical Review*, 76(3) : 347–367.
- [Bai et Yun, 1996] Bai, D. S. et Yun, H. J. (1996). Optimal allocation of inspection effort in a serial multi-stage production system. *Computers & Industrial Engineering*, 30(3) : 387–396.
- [Bassetto et Siadat, 2009] Bassetto, S. et Siadat, A. (2009). Operational methods for improving manufacturing control plans : case study in a semiconductor industry. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20 : 55–65. 10.1007/s10845-008-0103-7.
- [Baud-Lavigne et al., 2010] Baud-Lavigne, B., Bassetto, S., et Penz, B. (2010). A broader view of the economic design of the x-bar chart in the semiconductor industry. *International Journal of Production Research*, 48(19) : 5843 – 5857.
- [Bettayeb et al., 2011] Bettayeb, B., Bassetto, S., Vialletelle, P., et Tollenaere, M. (2011). Quality and exposure control in semiconductor manufacturing. part ii : Evaluation. *International Journal of Production Research*, 0(0) : 1–18.
- [Britney, 1972] Britney, R. R. (1972). Optimal screening plans for nonserial production systems. *Management Science*, 18(9) : 550–559.
- [Celano, 2009] Celano, G. (2009). Robust design of adaptive control charts for manual manufacturing/inspection workstations. *Journal of Applied Statistics*, 36(2) : 181–203.

- [Champ et Woodall, 1987] Champ, C. et Woodall, W. (1987). Exact results for shewhart control charts with supplementary runs rules. *Technometrics*, pages 393–399.
- [Chelbi et Ait-Kadi, 2000] Chelbi, A. et Ait-Kadi, D. (2000). Generalized inspection strategy for randomly failing systems subjected to random shocks. *International Journal of Production Economics*, 64(1–3) : 379–384.
- [Chiu et Wetherill, 1974] Chiu, W. K. et Wetherill, G. B. (1974). A simplified scheme for the economic design of x-charts. *Journal of Quality Technology*, 6 : 63–69.
- [Chrysler et al., 1995] Chrysler, C., Ford Motor, C., et General Motors, C. (1995). *Advanced Product Quality Planning and Control Plan APQP*. AIAG.
- [Colledani et Tolio, 2009] Colledani, M. et Tolio, T. (2009). Performance evaluation of production systems monitored by statistical process control and off-line inspections. *International Journal of Production Economics*, 120(2) : 348–367.
- [Colledani et Tolio, 2010] Colledani, M. et Tolio, T. (2010). Integrated analysis of quality and production logistics performance in manufacturing lines. *International Journal of Production Research*.
- [Coolen et Dekker, 1995] Coolen, F. et Dekker, R. (1995). Analysis of a 2-phase model for optimization of condition-monitoring intervals. *Reliability, IEEE Transactions on*, 44(3) : 505–511.
- [De Magalhães et al., 2009] De Magalhães, M., Costa, A., et Moura Neto, F. (2009). A hierarchy of adaptive x-bar control charts. *International Journal of Production Economics*, 119(2) : 271–283.
- [De Magalhães et al., 2006] De Magalhães, M. S., Costa, A. F. B., et Neto, F. D. M. (2006). Adaptive control charts : A markovian approach for processes subject to independent disturbances. *International Journal of Production Economics*, 99(1–2) : 236–246.
- [De Magalhães et al., 2001] De Magalhães, M. S., Epprecht, E. K., et Costa, A. F. B. (2001). Economic design of a vp chart. *International Journal of Production Economics*, 74(1–3) : 191–200.
- [Deloux et al., 2009] Deloux, E., Castanier, B., et Bérenguer, C. (2009). Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2) : 418 – 431.
- [Department of defense, 1980] Department of defense, U. S. (1980). Procedures for performing a failure mode, effects, and criticality analysis.
- [Dodge, 1943] Dodge, H. (1943). A sampling inspection plan for continuous production. *The Annals of Mathematical Statistics*, 14(3) : 264–279.
- [Dodge et Romig, 1929] Dodge, H. et Romig, H. (1929). A method of sampling inspection. *The Bell System Technical Journal*, 8(4) : 613–631.

- [Duncan, 1956] Duncan, A. J. (1956). The economic design of \bar{x} charts used to maintain current control of a process. *Journal of the American Statistical Association*, 51(274) : 228–242.
- [Duret et Pillet, 2005] Duret, D. et Pillet, M. (2005). *Qualité en production : De l'ISO 9000 à Six Sigma*. Editions d'Organisation, 3ème édition.
- [Emmons et Rabinowitz, 2002] Emmons, H. et Rabinowitz, G. (2002). Inspection allocation for multistage deteriorating production systems. *IIE Transactions*, 34(12) : 1031–1041.
- [Eppen et Hurst, 1974] Eppen, G. D. et Hurst, E. G. (1974). Optimal location of inspection stations in a multistage production process. *Management Science*, 20(8) : 1194–1200.
- [Garey et Johnson, 1979] Garey, M. R. et Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman AND Company, First Edition.
- [Golmakani, 2011] Golmakani, H. R. (2011). Condition-based inspection scheme for condition-based maintenance. *International Journal of Production Research*, 0(0) : 1–16.
- [Govindaraju et Kandasamy, 2000] Govindaraju, K. et Kandasamy, C. (2000). Design of generalized csp-c continuous sampling plan. *Journal of Applied Statistics*, 27(7) : 829–841.
- [Grall et al., 2002a] Grall, A., Berenguer, C., et Dieulle, L. (2002a). A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(2) : 167–180.
- [Grall et al., 2002b] Grall, A., Dieulle, L., Berenguer, C., et Roussignol, M. (2002b). Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system. *Reliability, IEEE Transactions on*, 51(2) : 141–150.
- [Holmes et Mergen, 2011] Holmes, D. S. et Mergen, A. E. (2011). Using SPC in conjunction with APC. *Quality Engineering*, 23 : 360–364.
- [Hong et al., 1998] Hong, S. H., Kim, S. B., Kwon, H. M., et Lee, M. K. (1998). Economic design of screening procedures when the rejected items are reprocessed. *European Journal of Operational Research*, 108(1) : 65–73.
- [Jensen et al., 2008] Jensen, W. A., Bryce, G. R., et Reynolds Jr, M. R. (2008). Design issues for adaptive control charts. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(4) : 429–445.
- [Jiang, 2004] Jiang, W. (2004). A joint monitoring scheme for automatically controlled processes. *IIE Transactions*, 36(12) : 1201–1210.
- [Jiang et Tsui, 2000] Jiang, W. et Tsui, K. (2000). An economic model for integrated APC and SPC control charts. *IIE Transactions*, 32(6) : 505–513.

- [Klinke et Renn, 2002] Klinke, A. et Renn, O. (2002). A new approach to risk evaluation and management : Risk-based, precaution-based, and discourse-based strategies. *Risk Analysis*, 22(6) : 1071–1094.
- [Ladany, 1973] Ladany, S. (1973). Optimal use of control charts for controlling current production. *Management Science*, pages 763–772.
- [Lewis, 2003] Lewis, M. A. (2003). Cause, consequence and control : towards a theoretical and practical model of operational risk. *Journal of Operations Management*, 21(2) : 205–224.
- [Lieberman et Solomon, 1955] Lieberman, G. J. et Solomon, H. (1955). Multi-level continuous sampling plans. *The Annals of Mathematical Statistics*, 26(4) : pp. 686–704.
- [Lin et Chou, 2005] Lin, Y. et Chou, C. (2005). On the design of variable sample size and sampling intervals charts under non-normality. *International Journal of Production Economics*, 96(2) : 249–261.
- [Linderman et al., 2005] Linderman, K., McKone-Sweet, K., et Anderson, J. (2005). An integrated systems approach to process control and maintenance. *European Journal of Operational Research*, 164(2) : 324–340.
- [Lindsay et Bishop, 1964] Lindsay, G. F. et Bishop, A. B. (1964). Allocation of screening inspection Effort—A Dynamic-Programming approach. *Management Science*, 10(2) : 342–352.
- [Liu et al., 2005] Liu, C. Q., Ding, Y., et Chen, Y. (2005). Optimal coordinate sensor placements for estimating mean and variance components of variation sources. *IIE Transactions*, 37(9) : 877–889.
- [Lorenzen et Vance, 1986] Lorenzen, T. J. et Vance, L. C. (1986). The economic design of control charts : A unified approach. *Technometrics*, 28(1) : 3–10.
- [Luss, 1976] Luss, H. (1976). Maintenance policies when deterioration can be observed by inspections. *Operations Research*, pages 359–366.
- [Mandrolis et al., 2006] Mandrolis, S. S., Shrivastava, A. K., et Ding, Y. (2006). A survey of inspection strategy and sensor distribution studies in discrete-part manufacturing processes. *IIE Transactions*, 38(4) : 309–328.
- [Markowitz, 1952] Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*, 7(1) : 77–91.
- [McCormack et al., 2000] McCormack, D. W., Harris, I. R., Hurwitz, A. M., et Spagon, P. D. (2000). Capability indices for non-normal data. *Quality Engineering*, 12(4) : 489–495.
- [Mili et al., 2009] Mili, A., Bassetto, S., Siadat, A., et Tollenaere, M. (2009). Dynamic risk management unveil productivity improvements. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(1) : 25–34.
- [Montgomery, 2005] Montgomery, D. C. (2005). *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons, Inc, United States of America, fifth edition edition.

- [Moyne et al., 2007] Moyne, J., Hajj, H., Beatty, K., et Lewandowski, R. (2007). SEMI E133–The process control system standard : Deriving a software interoperability standard for advanced process control in semiconductor manufacturing. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 20(4) : 408–420.
- [Narahari et Khan, 1996] Narahari, Y. et Khan, L. M. (1996). Modeling reentrant manufacturing systems with inspection stations. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(6) : 367–378.
- [Oakland, 2007] Oakland, J. (2007). *Statistical process control*. Butterworth-Heinemann.
- [Onoufriou, 1999] Onoufriou, T. (1999). Reliability based inspection planning of offshore structures. *Marine Structures*, 12(7–8) : 521–539.
- [Ozouf, 2009] Ozouf, V. (2009). *Comment conserver un niveau de risques acceptable dans un contexte de conception / industrialisation de plus en plus rapide d'un produit de plus en plus complexe ?* Thèse de Doctorat, Université de Savoie.
- [Ozouf et Pillet, 2007] Ozouf, V. et Pillet, M. (2007). Build your control plan in a design to risk objective - a new way to use Process FMEA. In *19th International conference on production research - ICPR19*, Valparaiso, Chili.
- [Park, 1988] Park, K. (1988). Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections. *Reliability, IEEE Transactions on*, 37(1) : 97–102.
- [Pillet, 2005] Pillet, M. (2005). *Appliquer la maîtrise statistique des processus (MSP/SPC)*. Éditions d'Organisation, 4ème édition edition.
- [Pillet et al., 2007] Pillet, M., Ozouf, V., Sergent, A., et Duret, D. (2007). La matrice d'impact pour construire un plan de surveillance avec les contraintes de l'ingénierie simultanée. In *CPI 2007, Rabat, Maroc*, Rabat, Maroc.
- [Porteus et Angelus, 1997] Porteus, E. et Angelus, A. (1997). Opportunities for improved statistical process control. *Management Science*, pages 1214–1228.
- [Prabhu et al., 1997] Prabhu, S. S., Montgomery, D. C., et Runger, G. C. (1997). Economic-statistical design of an adaptive x-bar chart. *International Journal of Production Economics*, 49(1) : 1–15.
- [Rau et Cho, 2009] Rau, H. et Cho, K. (2009). Genetic algorithm modeling for the inspection allocation in reentrant production systems. *Expert Systems with Applications*, 36(8) : 11287–11295.
- [Rau et al., 2005] Rau, H., Chu, Y. H., et Cho, K. H. (2005). Layer modelling for the inspection allocation problem in re-entrant production systems. *International Journal of Production Research*, 43(17) : 3633.
- [Raz, 1986] Raz, T. (1986). A survey of models for allocating inspection effort in multistage production systems. *Journal of quality technology*, pages 239–247.
- [Rebello et al., 1995] Rebello, R., Agnetis, A., et Mirchandani, P. B. (1995). Specialized inspection problems in serial production systems. *European Journal of Operational Research*, 80(2) : 277–296.

- [Reynolds et al., 1988] Reynolds, Marion R., J., Amin, R. W., Arnold, J. C., et Nachlas, J. A. (1988). \bar{x} charts with variable sampling intervals. *Technometrics*, 30(2) : 181–192.
- [Rohleder et Silver, 2002] Rohleder, T. R. et Silver, E. A. (2002). Statistical process control subject to a labour resource constraint. *International Journal of Production Research*, 40(14) : 3337–3356.
- [Schippers, 2001] Schippers, W. A. J. (2001). An integrated approach to process control. *International Journal of Production Economics*, 69(1) : 93–105.
- [SEMI, 2007] SEMI (2007). Standard SEMI E133 : Provisional standard for automated process control systems interface. *Semiconductor Equipment and Materials Int.*
- [Shamsuzzaman et al., 2009] Shamsuzzaman, M., Wu, Z., et Reaz-us Salam, M. E. (2009). Designs of \bar{x} & s control charts with optimal manpower deployment. *Computers & Industrial Engineering*, 56(4) : 1589 – 1596.
- [Shanthikumar, 2007] Shanthikumar, J. G. (2007). Effects of capture rate and its repeatability on optimal sampling requirements in semiconductor manufacturing. In *International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, pages 1 – 6, Santa Clara, CA, USA.
- [Shetwan et al., 2011] Shetwan, A. G., Vitanov, V. I., et Tjahjono, B. (2011). Allocation of quality control stations in multistage manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 60(4) : 473–484.
- [Shewhart, 1931] Shewhart, W. (1931). *Economic control of quality of manufactured product*, volume 509. American Society for Quality.
- [Shiau, 2002] Shiau, Y. (2002). Inspection resource assignment in a multistage manufacturing system with an inspection error model. *International Journal of Production Research*, 40(8) : 1787.
- [Silver et Rohleder, 1999] Silver, E. A. et Rohleder, T. R. (1999). The economic design of an \bar{x} control chart recognizing process improvement. *International Journal of Production Research*, 37(2) : 393.
- [Smilowitz et Madanat, 2000] Smilowitz, K. et Madanat, S. (2000). Optimal inspection and maintenance policies for infrastructure networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(1) : 5–13.
- [Stephens, 1986] Stephens, K. S. (1986). *How to perform continuous sampling (CSP)*. Milwaukee, Wis : American Society for Quality Control, Statistics Division.
- [Stoumbos et al., 2000] Stoumbos, Z., Reynolds, M., Ryan, T., et Woodall, W. (2000). The state of statistical process control as we proceed into the 21st century. *Journal of the American Statistical Association*, 95(451) : 992–998.
- [Stoumbos, 2002] Stoumbos, Z. G. (2002). Process capability indices : overview and extensions. *Nonlinear Analysis : Real World Applications*, 3(2) : 191 – 210.

- [Straub et Faber, 2005] Straub, D. et Faber, M. H. (2005). Risk based inspection planning for structural systems. *Structural Safety*, 27(4) : 335 – 355.
- [Szegö, 2005] Szegö, G. (2005). Measures of risk. *European Journal of Operational Research*, 163(1) : 5–19.
- [Tagaras, 1998] Tagaras, G. (1998). A survey of recent developments in the design of adaptive control charts. *Journal of quality technology*, 30(3) : 212–231.
- [Tixier et al., 2002] Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., et Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(4) : 291–303.
- [Tsung et Shi, 1999] Tsung, F. et Shi, J. (1999). Integrated design of run-to-run PID controller and SPC monitoring for process disturbance rejection. *IIE transactions*, 31(6) : 517–527.
- [Vining, 2010] Vining, G. (2010). Technical advice : Statistical process control and Automatic/Engineering process control. *Quality Engineering*, 22 : 222–224.
- [Wang, 2000] Wang, W. (2000). A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance. *International Journal of Production Research*, 38(6) : 1425–1436.
- [Wang, 2003] Wang, W. (2003). Modelling condition monitoring intervals : A hybrid of simulation and analytical approaches. *Journal of the Operational Research Society*, pages 273–282.
- [Wang et Nagarkar, 1999] Wang, Y. M. et Nagarkar, S. R. (1999). Locator and sensor placement for automated coordinate checking fixtures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121(4) : 709–719.
- [Woodall, 1997] Woodall, W. (1997). Control charts based on attribute data : bibliography and review. *Journal of Quality Technology*, 29(2) : 172–183.
- [Woodall, 2000] Woodall, W. (2000). Controversies and contradictions in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, 32(4) : 341–350.
- [Woodall, 1999] Woodall, W. H. (1999). Research issues and ideas in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, pages 376–386.
- [Woodall et al., 1986] Woodall, W. H., Lorenzen, T. J., et Vance, L. C. (1986). Weaknesses of the economic design of control charts. *Technometrics*, 28(4) : 408–410.
- [Worden et Burrows, 2001] Worden, K. et Burrows, A. (2001). Optimal sensor placement for fault detection. *Engineering Structures*, 23(8) : 885 – 901.
- [Wu et al., 2009] Wu, C.-W., Pearn, W., et Kotz, S. (2009). An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. *International Journal of Production Economics*, 117(2) : 338 – 359.
- [Wu et al., 2006] Wu, Z., Shamsuzzaman, M., et Wang, Q. (2006). Designs of control charts with optimal manpower deployment. *International Journal of Production Research*, 44(11) : 2119–2132.

[Yang, 1983] Yang, G. L. (1983). A renewal-process approach to continuous sampling plans. *Technometrics*, 25(1) : pp. 59–67.

Du même auteur

- [Bettayeb et al., 2011a] **Bettayeb, B.**, Bassetto, S., Vialletelle, P., et Tollenaere, M. (2011). Quality and exposure control in semiconductor manufacturing. Part I : Modelling. *International Journal of Production Research*, À paraître, DOI : 10.1080/00207543.2011.630042.
- [Bettayeb et al., 2011b] **Bettayeb, B.**, Bassetto, S., Vialletelle, P., et Tollenaere, M. (2011). Quality and exposure control in semiconductor manufacturing. Part II : Evaluation. *International Journal of Production Research*, À paraître, DOI : 10.1080/00207543.2011.630043.
- [Sahnoun et al., 2012] Sahnoun, M., **Bettayeb, B.**, Tollenaere, M., Bassetto, S. (2012) Smart sampling for risk reduction and delay optimisation. *IEEE International Systems Conference*, Vancouver, Canada, 19–22 mars 2012.
- [Bettayeb et al., 2011c] **Bettayeb, B.**, Tollenaere, M., et Bassetto, S. (2011). Plan de surveillance basé sur l'exposition aux risques et les capacités des ressources. *9ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI2011)*, Saint-Sauveur, Canada, 10–14 octobre 2011, 6p.
- [Sahnoun et al., 2011] Sahnoun, M., **Bettayeb, B.**, Vialletelle, P., MILI, A., et Tollenaere. (2011) Impact of Sampling on W@R and Metrology Time delay. *Intel European Research & Innovation Conference (ERIC2011)*, Dublin, Ireland, 12–14 octobre 2011.
- [Bettayeb et al., 2011d] **Bettayeb, B.**, Tollenaere, M., et Bassetto, S. (2011). Plan de surveillance basé sur l'exposition aux risques et les aptitudes des ressources. *4èmes Journées Doctorales/Journées Nationales MACS (JD-JN-MACS'11)*, Marseille, France, 9–10 juin 2011.
- [Bettayeb et al., 2010a] **Bettayeb, B.**, Vialletelle, P., Bassetto, S., et Tollenaere, M. (2010). An approach for operational risk evaluation and its link to control plan. *13th ARCSIS Technical & Scientific Meeting, Manufacturing Challenges in European semiconductor fabs (ARCSIS010)*, Rousset, France, 18–19 novembre 2010.
- [Bettayeb et al., 2010b] **Bettayeb, B.**, Vialletelle, P., Bassetto, S., et Tollenaere, M. (2010). Optimized design of control plans based on risk exposure and resources capabilities. *IEEE Conference publications of International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM2010)*, Tokyo, Japan, 18–20 octobre 2010, 4p.
- [Bettayeb et al., 2008] **Bettayeb, B.**, Kacem, I., et Adjallah, K.H. (2008). An improved branch-and-bound algorithm to minimize the weighted flowtime on

identical parallel machine with family setup times. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 17 :4, pp.446–459, 2008.

[Bettayeb et al., 2006a] **Bettayeb, B.**, Kacem, I., et Adjallah, K.H. (2006). An improved branch and bound algorithm for solving the identical parallel machines scheduling problem with family setup times. *IEEE Conference publications of IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, Beijing, China, 4–6 octobre 2006, volume : 1, pp.1040–1046.

[Bettayeb et al., 2006b] **Bettayeb, B.**, Kacem, I., et Adjallah, K.H. (2006). Ordonancement sur machines parallèles identiques avec temps de préparation par famille : application à la gestion des tâches de maintenance préventive. *6e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation (MOSIM'06)*, Rabat, Maroc, 3–5 avril 2006.

DOCUMENTS ANNEXES

LE PROJET EUROPÉEN IMPROVE

1 Introduction

L'industrie européenne des composants microélectroniques est confrontée à une forte concurrence de la part des États-Unis et d'Asie qui attirent de plus en plus d'investissements que ce soit dans la fabrication ou la R&D (Recherche et Développement). Comme dans toute activité appliquant le principe de l'ouverture du marché, une meilleure compétitivité est donc nécessaire pour faire face à cette concurrence. Ce qui signifie de proposer des produits de haute qualité à des coûts raisonnables. Le projet européen IMPROVE a été lancé dans cette perspective. Il regroupe près de 37 partenaires : des industriels du monde du semi-conducteur, des académiques et des sociétés de développement logiciel en Europe. Le projet se compose de 7 volets ou groupes de tâches (Work-Packages en anglais) dont trois (WP2, WP3 et WP4) représentent les axes de recherche majeurs visés par le projet (voir Figure [A.1](#)).

2 WP2 : Développement de la métrologie virtuelle

L'objectif est de développer des techniques permettant le contrôle du processus au niveau de la plaquette tout en supprimant les étapes de la métrologie standard. La métrologie virtuelle est un concept visant à prédire les paramètres physiques et électriques de plaquettes et/ou périphériques à partir d'informations collectées en temps réel à partir des outils de fabrication (par exemple, paramètres équipements ou processus) et d'autres sources disponibles (par exemple, des informations de contexte de production ou des résultats du métrologie amont). L'objectif

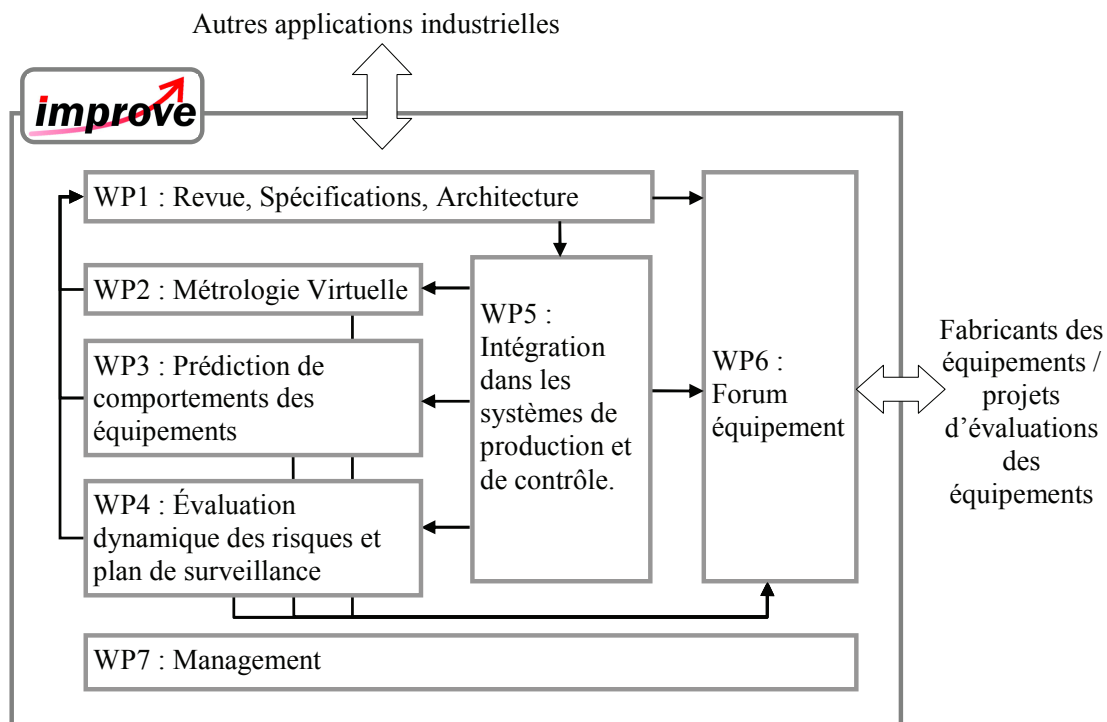


FIGURE A.1 – Les Workpackages du projet IMPROVE

de cette technique est de fournir des mesures virtuelles dans le cas où les mesures réelles ne sont pas disponibles, ne sont pas faisables ou trop chères à avoir (coûts élevés de matériel et/ou temps de mesure élevés).

3 WP3 : Développement de la maintenance prédictive (PdM)

L'objectif est de développer des techniques pour améliorer la fiabilité du processus en optimisant la fréquence d'entretien tout en augmentant la disponibilité des équipements. Le concept de maintenance prédictive est utilisé pour donner un pronostic sur le comportement des équipements à court terme. Son avantage est que les défaillances peuvent être prévues et évitées par le lancement d'actions de maintenance préventive. Les cycles de maintenance, qui sont souvent basées sur le temps, peuvent ainsi être optimisés en les remplaçant par des actions de maintenance basées sur les événements détectés.

4 WP4 : Développement du plan de surveillance dynamique

L'objectif est d'améliorer l'efficacité du plan de surveillance en utilisant au mieux les capacités de mesure disponibles. Le concept de planification adaptative de la surveillance prend avantage de la connaissance en temps réel du « facteur de santé » de la ligne de production issus de la métrologie virtuelle et la maintenance prédictive. Basé sur une évaluation dynamique des risques, la plan de surveillance doit s'adapter dynamiquement, en diminuant la fréquence des contrôles dans les zones stables tout en augmentant le contrôle en cas de besoin dans une zone sensible. Ce groupe de tâches se compose des trois tâches complémentaires suivantes :

4.1 WP4.1 : Modélisation et évaluation dynamique du risque

L'objectif de cette tâche est de construire un modèle d'évaluation des risques équipement et processus. L'évaluation concerne un horizon de long terme pour les risques relatifs aux technologies (familles de produits). Quant aux risques relatifs aux outils de fabrication, l'évaluation de ces risques se fait sur un horizon court terme. Le modèle se base sur les historiques des équipements récoltés dans l'usine. Le résultat attendu est une estimation d'un indicateur de santé (Equipment Health Factor) des équipements vis-à-vis des différents modes de défaillance auxquels ils peuvent être exposés. Cet indicateur, auquel est associé un degré de confiance d'estimation, est calculé en utilisant des méthodes statistiques et probabilistes se basant sur des données historiques concernant les paramètres de l'équipement, les activités de maintenance et de contrôle de processus et les données des produits.

4.2 WP4.2 : Calcul du plan de surveillance cible

L'objectif de WP4.2 est de développer et valider des algorithmes permettant de calculer automatiquement le plan de surveillance cible optimal. L'optimalité recherchée est définie par rapport à un horizon moyen terme du plan de surveillance et selon des données moyennes estimées sur l'horizon considéré. Les données utilisées concernent le plan de production ou de prévision de charge, les ressources de contrôle disponibles, les risques à prendre en considération, les paramètres de coût et de temps, ainsi que les contraintes liées aux ressources, aux normes/standards,... Une description plus détaillée de cette tâche est donnée dans

la section suivante (1.2).

4.3 WP4.3 : Plan de surveillance adaptatif

Cette tâche vise à trouver des solutions algorithmiques pour appliquer en temps réel le plan de surveillance et l'adapter au contexte de production. L'objectif est d'ajuster automatiquement les décisions d'échantillonnage aux événements opérationnels et à l'évolution dynamique des facteurs de risque tout en essayant de respecter le plus possible le plan de surveillance cible. À ce stade, les décisions à prendre concernent les différentes étapes de contrôle des lots de fabrication pendant leur parcours du processus de fabrication.

5 La tâche WP4.2 : Calcul du plan de surveillance cible

Cette tâche représente le cadre général et les objectifs des travaux de recherche effectués pendant la durée de cette thèse. La Figure A.2 représente les différentes activités de cette tâche.

5.1 Modélisation de la valeur ajoutée des mesures

Cette activité concerne l'évaluation de la valeur ajoutée des mesures. Le but est de quantifier l'impact de la mise en œuvre ou la suppression du contrôle qui utilise la mesure considérée. Un modèle est donc à établir pour évaluer l'effet d'un contrôle en termes de réduction du risque.

5.2 Caractérisation des tolérances d'échantillonnage

Il s'agit ici de définir les degrés de liberté des échantillonnages en assurant que les risques pris en considération ne dépassent pas certaines limites prédéfinies. Ces degrés de liberté concernent le choix des mesures et de leur fréquence d'échantillonnage. Plus concrètement, il s'agit de définir un modèle liant risque, type de contrôle et fréquence de mesure.

5.2 Calcul du plan de surveillance

Le plan de surveillance cible définit les types de contrôles à effectuer, à quelle fréquence et avec quelles tolérances. Cette tâche consiste à chercher des algorithmes permettant de calculer le meilleur plan de surveillance pour un plan de production donné dans le but de trouver un équilibre entre les coûts des contrôles et

leurs effets positifs sur la réduction des risques.

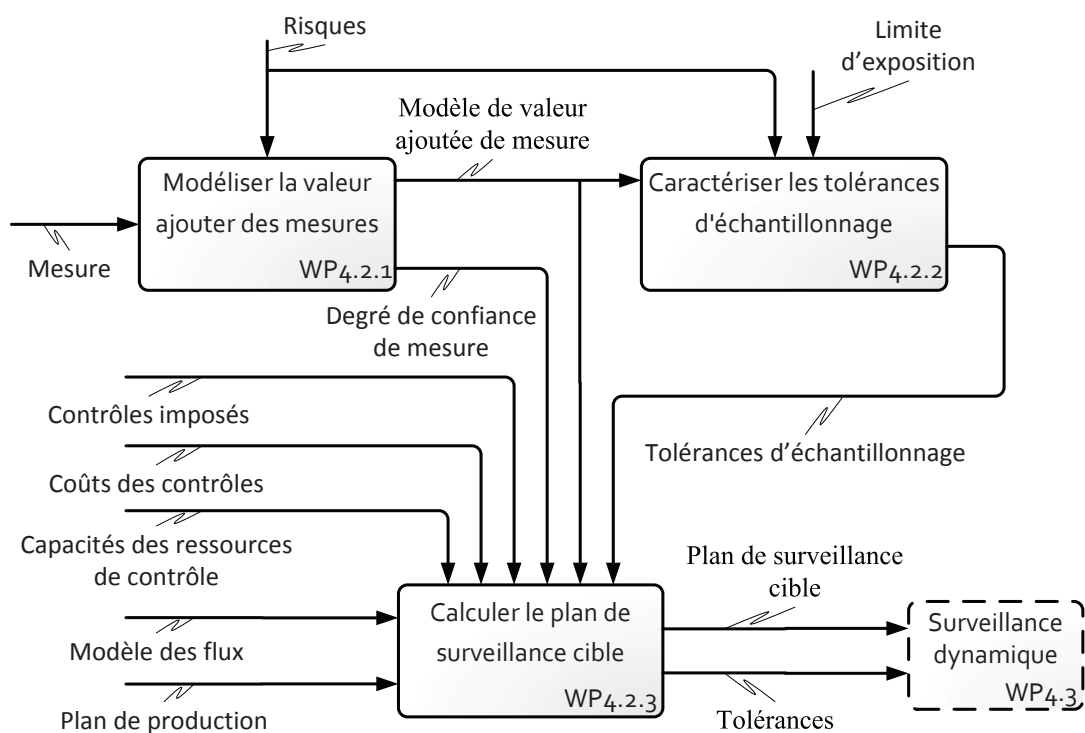


FIGURE A.2 – La tâche WP4.2

LA MÉTHODE AMDEC

1 Historique, Définitions

L'AMDEC est une méthode d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) en anglais). Cette méthode est dite AMDE lorsque l'étude ne contient pas l'étape d'évaluation de la criticité de chacun des modes de défaillance. L'origine de cette méthode remonte aux années 1950 aux États-Unis. Dédiée à l'origine à la mise au point des produits, son usage a été étendu à la mise au point des procédés, puis des systèmes et en couvrant toutes les étapes de la vie du produit dans le but d'améliorer la satisfaction du client. Son utilisation intensive dans les secteurs de l'aéronotique et de l'automobile, ainsi que l'apparition des normes internationales incitant à son utilisation, ont fait que cette méthode est actuellement largement répandu.

Fondée sur le travail de groupe, L'AMDEC est une méthode qualitative basée sur un raisonnement inductif visant à identifier les risques de pannes potentielles contenues dans un système de façon à les supprimer ou à les maîtriser. La notion de système dans une AMDEC peut être très large qui peut être un produit, un processus de production ou l'organisation d'un service.

Le Mode de défaillance : Une défaillance étant la cessation de l'aptitude d'un système (élément ou composant) à assurer une fonction requise, un mode de défaillance représente la manière avec laquelle la défaillance se manifeste. Un mode de défaillance doit répondre aux caractéristiques suivantes : il est relatif à la fonction étudiée ; il décrit la manière dont le système ne remplit plus sa fonction et

il s'exprime en termes techniques précis (court-circuit, déformation, fuite,...). On distingue 5 modes génériques de défaillance : perte de la fonction ; fonctionnement intempestif ; refus de démarrer ; refus d'arrêter et fonctionnement dégradé.

Cause de défaillance : Une cause de défaillance est l'événement initial pouvant conduire à la défaillance d'un dispositif par l'intermédiaire de son mode de défaillance. Plusieurs causes peuvent être associées à un même mode de défaillance. Une même cause peut provoquer plusieurs modes de défaillance. Exemple : enrassement, corrosion, dérive d'un capteur, etc.

Effet de la défaillance : L'effet d'une défaillance est, par définition, une conséquence subie par l'utilisateur. Il est associé au couple (mode-cause de défaillance) et correspond à la perception finale de la défaillance par l'utilisateur. Exemple : arrêt de production, détérioration d'équipement, explosion, pollution, etc.

Mode de détection : Une cause de défaillance étant supposée apparue, le mode de détection est la manière par laquelle un utilisateur (opérateur et/ou mainteneur) est susceptible de détecter sa présence avant que le mode de défaillance ne se soit produit complètement, c'est-à-dire bien avant que l'effet de la défaillance ne puisse se produire. Exemple : détection visuelle, température, odeurs, bruits, etc.

Criticité : La criticité est une évaluation quantitative du risque constitué par le scénario (mode-cause-effet-détection) de défaillance analysé. La criticité est évaluée à partir de la combinaison de trois notes :

- L'Occurrence (*O*) : la fréquence d'apparition du couple mode-cause ;
- La Gravité (*G*) : la gravité de l'effet ;
- La non-Détectabilité (*D*) : la possibilité d'utiliser les signes de détection

On définit alors la « Criticité » ou « niveau de priorité de risque » (NPR) qui sera le produit de ces trois notes : $NPR = O \times G \times D$ La notation de ces trois attributs du risque est effectuée en utilisant des grilles de cotation préalablement définie. Ces grilles sont souvent constituées des échelles de notation allant de 1 à 10 avec 1 la note la plus favorable et 10 la plus défavorable. Par exemple, on donnera une note d'occurrence *O* plus élevée à un mode de défaillance qui risque d'arriver une fois par jour que celui qui n'a une chance d'arriver qu'une fois par semaine.

Le tableau AMDEC : L'ensemble de l'étude est synthétisé sur un tableau d'analyse qui jouera le rôle de guide pour les participants de l'AMDEC. Ce support graphique sert aussi pour la mise à jour et le suivi des actions correctives menées. Dans ce tableau (voir Figure B.1), on retrouve pour chaque défaut potentiel les trois éléments d'un mode de défaillance, la notation, les éléments d'une action corrective éventuelle ainsi que la nouvelle notation résultante.

	Produit		Processus	Prévu/Existant					Actions			Résultat			
OP	Défaut potentiel	Effet défaut	Cause défaut	Plan de surveillance	Note				Responsable	Délai	Mesures	Note			
					F	G	D	NPR				D'	F'	G	NPR

FIGURE B.1 – Tableau d'analyse AMDEC

2 Types d'AMDEC

Selon le point de départ de l'analyse (fonctions du produit ou des composants du produit, fonctions de la machine ou des composants de la machine, étapes de processus, etc.), ainsi que la nature des causes à rechercher, il existe plusieurs types d'AMDEC dont les finalités sont très proches quelque soit les domaines où elles sont appliquées. Dans le domaine industriel, on distingue 3 types dont on fait souvent référence : Produit, Processus et Machine.

L'AMDEC produit Elle peut être réalisée à différents stades de la conception du produit et elle est d'autant plus efficace lorsqu'elle intervient plutôt dans le processus de conception. L'AMDEC produit est utilisée pour l'aide à la validation des études de définition d'un nouveau produit fabriqué par l'entreprise. Elle est mise en oeuvre pour évaluer les défauts potentiels du nouveau produit et leurs causes. Cette évaluation de tous les défauts possibles permettra d'y remédier, après hiérarchisation, par la mise en place d'actions correctives sur la conception et préventives sur l'industrialisation.

L'AMDEC Processus Elle permet de valider la gamme de fabrication d'un produit afin qu'elle satisfasse les caractéristiques définies par le bureau d'études. Elle consiste à rechercher dans une gamme de fabrication l'ensemble des situations qui peuvent engendrer des produits défectueux.

L'AMDEC Moyen ou Machine Ce type d'AMDEC se focalise sur un moyen de production afin de :

- diminuer le nombre de rebuts ;
- diminuer le taux de panne ;
- augmenter la capacité.

3 Méthodologie

Une étude AMDEC est une démarche structurée autour des étapes suivantes :

1. Initialisation et préparation de l'étude

Le but est de bien préciser le sujet étudié (produit, sous-ensemble, ...), l'objectif et les limites de l'étude. Dans cette étape, le groupe de travail est constitué et le plan de travail est aussi précisé. Pour préparer l'étude, il est nécessaire de rassembler toute information permettant d'aider le groupe de travail dans cette étude. Ces supports diffèrent selon le type d'AMDEC à réaliser.

2. Identifier les causes de défaillances et les effets

Le but de cette étape est d'identifier les modes de défaillances potentiels du produit, du processus ou de la machine étudiée item par item en utilisant une méthode de brainstorming. Selon le type d'AMDEC, la notion d'item est différente. Pour une AMDEC Produit, les items sont les fonctions principales et secondaires du produit. Pour une AMDEC Processus, un item est une étape de processus tel que : montage, stockage, transfert, ... Quant à l'AMDEC machine, les items correspondent à des systèmes ou des sous-systèmes techniques tel que : moteur, vérin, capteurs, ... Une fois un mode de défaillance identifié, ses causes et ses sous-causes doivent être recensées sous forme d'un arbre de défaillance qui se limitera à un niveau des sous-causes sur lesquelles l'entreprise peut agir. Ensuite, il est nécessaire d'évaluer l'effet que peut avoir cette défaillance sur la qualité, sur les coûts et sur les performances.

3. Hiérarchiser les défaillances par une notation

Pour hiérarchiser les défaillances, il faut les évaluer en donnant une note pour chacun de ses attributs qui sont la fréquence (O), la gravité (G) et la détection (D). Le produit de ces trois critères $F \times G \times D$ donne le Niveau de Priorité de Risque (NPR) qui permet de hiérarchiser les causes. Cette hiérarchisation est nécessaire pour orienter les choix des actions correctives à mettre en place.

4. Apporter des actions correctives en prévention

Après l'évaluation de la criticité, on se fixe une limite d'acceptation NPR_L . Toutes les causes de défaillances dont le NPR dépasse cette limite doivent être traitées par le groupe afin d'éliminer la cause ou d'abaisser le NPR en dessous de la limite acceptable. Le choix de NPR_L se fait de façon empirique et est souvent autour de 100 dans le cas des grilles de notation variant entre 1 et 10. En règle générale, tout risque (mode de défaillance) ayant $NPR > NPR_L$ fait l'objet d'une action corrective. De même si une gravité est cotée au plus haut de la grille de notation de gravité, c'est-à-dire qu'elle met en péril la sécurité des utilisateurs, il doit y avoir modification de la conception pour diminuer le risque. Pour chaque action corrective, il faut compléter la feuille d'analyse en précisant le triplet : une action, une personne, un délai.

Après avoir précisé l'action corrective envisagée, le groupe évalue le NPR prévisionnel après correction. Le niveau de risque ne change pas, cependant l'action corrective doit avoir pour but de diminuer la probabilité d'apparition de la cause ou de mettre en place un contrôle pour diminuer le risque lié à la détection.

À l'issue de cette étape de définition des actions correctives à mener, un calendrier des actions à réaliser et des réunions de suivi est nécessaire pour valider le résultat des actions qui sont réalisées par les services opérationnels de l'entreprise. Le suivi des actions correctives est impératif pour vérifier que les objectifs de l'étude AMDEC sont atteints et boucler l'étude.

LES PREUVES DES PROPRIÉTÉS ET DES COROLLAIRES

1 Preuve de la propriété 1

Soit $AV^{u(n)}$ la valeur ajoutée d'un plan de surveillance contenant n contrôles répartis de façon uniforme sur l'horizon de planification H aux dates définies par : $T^u = (t_1^u, t_2^u, \dots, t_n^u)$, avec

$$t_i^u - t_{i-1}^u = \frac{H}{n+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$AV^{u(n)} = MAR_{max}^0 - \alpha \frac{H}{n+1}$$

Supposons qu'il existe un deuxième plan de surveillance, noté $\neg u(n)$, contenant le même nombre de contrôles mais qui ne sont pas répartis équidistamment. Il suffit donc démontrer que la valeur ajouter de ce plan de surveillance ne peut en aucun cas être supérieur à celle du plan de surveillance $u(n)$, c'est à dire $AV^{\neg u(n)} < AV^{u(n)}$

Dans le du plan de surveillance avec répartition non uniforme des contrôle, il existe au moins un contrôle i (à effectuer à l'instant $t_i^{\neg u}$) qui est situé entre deux contrôles avec deux distances différentes alors que les autres contrôles sont uniformément répartis, c'est à dire :

$$(t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u) \neq (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u}) \text{ et } t_j - t_{j-1} = Cte, \text{ avec}$$

$$t_j = t_j^u = t_j^{\neg u} \quad \forall j \in \{1, \dots, i-1\} \cup \{i+2, \dots, n+1\}$$

Dans ce cas la valeur ajoutée $AV^{\neg u(n)}$ va dépendre seulement de $t_i^{\neg u}$ car :

$$AV^{\neg u(n)} = R_{max}^0 - \alpha \times \max\left\{\frac{H}{n+1}; (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u); (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u})\right\}$$

Il existe deux cas possible concernant $t_i^{\neg u}$ (Voir Figure C.1) :

– Cas $t_{i-1}^u < t_i^{\neg u} < t_i^u$ - (Figure C.1. a))

$$\frac{H}{n+1} < (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u) < (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u}), \text{ alors}$$

$$AV^{\neg u(n)} = R_{max}^0 - \alpha \times \max\left\{\frac{H}{n+1}; (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u); (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u})\right\} = R_{max}^0 - \alpha \times (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u})$$

$$\frac{H}{n+1} < (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u}) \Rightarrow AV^{\neg u(n)} < AV^{u(n)}$$

– Cas $t_i^u < t_i^{\neg u} < t_{i+1}^u$ (Figure C.1. b))

$$\frac{H}{n+1} < (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u}) < (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u)$$

$$AV^{\neg u(n)} = R_{max}^0 - \alpha \times \max\left\{\frac{H}{n+1}; (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u); (t_{i+1}^u - t_i^{\neg u})\right\} = R_{max}^0 - \alpha \times (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u)$$

$$\frac{H}{n+1} < (t_i^{\neg u} - t_{i-1}^u) \Rightarrow AV^{\neg u(n)} < AV^{u(n)}$$

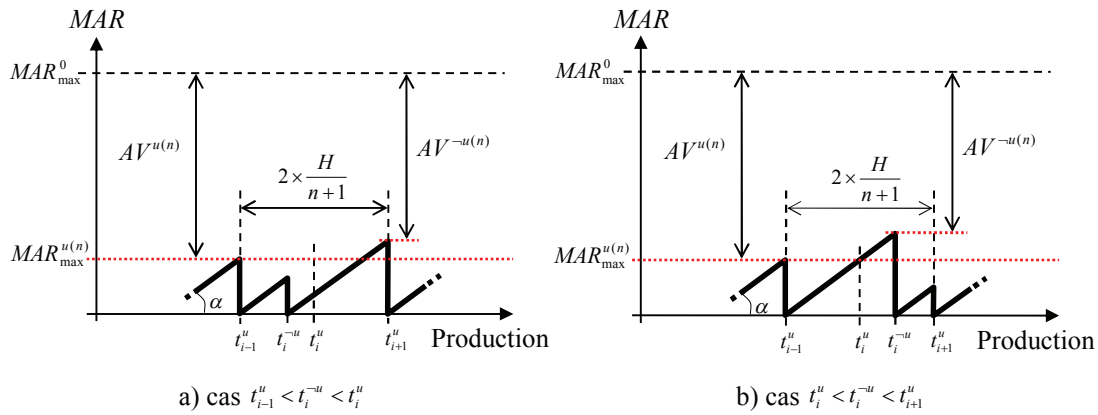


FIGURE C.1 – Deux cas possibles pour $t_i^{\neg u}$

Dans les deux cas $AV^{\neg u(n)} < AV^{u(n)}$, alors $\neg \exists i \in \{1, \dots, n\} / t_i^{\neg u} \neq t_i^u$ et $AV^{\neg u(n)} > AV^{u(n)}$

Alors, la répartition uniforme des contrôles sur l'horizon H maximise la valeur ajoutée du plan de surveillance. ■

2 Preuve de la propriété 2

La propriété 1 indique que dans un plan de surveillance optimal, les pics du MAR sont au même niveau. Dans le cas avec délais constant τ_z (Figure C.2), le MAR ne peut jamais être en dessous de τ_z/α . Donc, la valeur optimale de $MAR_{max,z}^{x*}$ va être égale à τ_z/α plus la valeur $MAR_{max,z}^{'x*}$ correspondant au cas sans délais avec un horizon $H'_z = H_z - \tau_z$. Si $\alpha = 1$, alors on a :

$$MAR_{max,z}^{x*} = \tau_z + MAR_{max,z}^{'x*} = \tau_z + \frac{H_z - \tau_z}{n_z + 1} \blacksquare$$

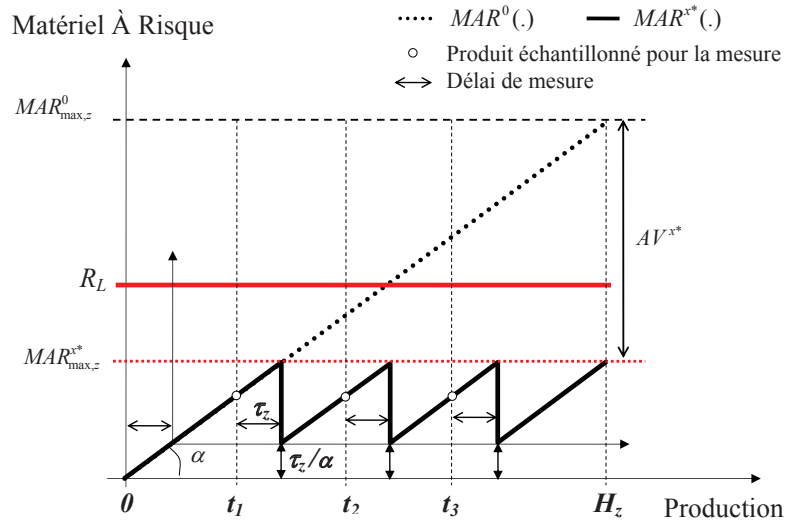


FIGURE C.2 – MAR optimal dans le cas avec délai de mesure constant

3 Preuve de la propriété 3

$$MAR_i = MAR(t_i + \tau_i) = MAR_{i-1} - \Delta_{i-1} + \alpha_{i-1}(t_i + \tau_i - (t_{i-1} + \tau_{i-1}))$$

Sachant que

$$\Delta_{i-1} = \rho_{i-1} \times MAR(t_{i-1}) = \rho_{i-1} \times (MAR_{i-1} - \alpha_{i-2}\tau_{i-1})$$

on a

$$MAR_i = MAR_{i-1} \times (1 - \rho_{i-1}) + \rho_{i-1}\alpha_{i-2}\tau_{i-1} + \alpha_{i-1}(t_i + \tau_i - (t_{i-1} + \tau_{i-1})) \blacksquare$$

4 Preuve de la propriété 4

La preuve consiste à démontrer que tout plan de surveillance X ne vérifiant pas cette propriété est dominé vis-à-vis la minimisation de l'exposition aux risques. Il suffit de démontrer qu'il existe un plan de surveillance X' ayant le même nombre de contrôles planifiés avec les mêmes outils de mesure que le plan de surveillance X et qui aboutit à une exposition aux risques inférieure. Dans l'évolution du MAR avec le plan de surveillance X (voir Figure C.3), il existe au moins un pic de MAR supérieur aux restes, qui sont égaux. Supposons que ce pic correspond au $j^{\text{ème}}$ contrôle définie par MAR_j^X

Soit X' un plan de surveillance identique à X à l'exception des dates de contrôles qui sont définies par :

$$t'_i = \begin{cases} t_i & \forall i \in \{1, \dots, j-1\} \\ t_i - \delta t & \forall i \in \{j, \dots, n\}; \delta t > 0 \end{cases}$$

Ce décalage à gauche des dates de contrôles à partir de $j^{\text{ème}}$ contrôle va diminuer les valeurs des pics de MAR correspondants sauf celui de la fin de l'horizon de planification ($MAR_{n+1} = MAR(H)$). Les nouvelles valeurs des pics de MAR sont calculés comme suit :

$$\begin{aligned} MAR'_i &= MAR_i \quad \forall i \in \{1, \dots, j-1\} \\ MAR'_j &= MAR_j - \alpha_j \delta t = MAR_j - \delta MAR_j \\ MAR'_{j+1} &= MAR'_j \times (1 - \rho_j) + \rho_j \alpha_j \tau_j + \alpha_{j+1} \Delta'_{j+1} \quad (\text{Propriété 3}) \\ \text{Avec } \Delta'_{j+1} &= \Delta_{j+1} \text{ on a} \\ MAR'_{j+1} &= MAR_{j+1} - \delta \alpha_j (1 - \rho_j) \\ &\vdots \\ MAR'_{j+k} &= MAR_{j+k} - \alpha_j \delta t \prod_{k'=j}^{j+k-1} (1 - \rho_{k'}) = MAR_{j+k} - \delta MAR_{j+k} \quad \forall k \in \{1, \dots, n-j\} \\ &\vdots \\ MAR'_n &= MAR_n + \alpha_n \delta t - \alpha_j \delta t \prod_{k'=j}^{n-1} (1 - \rho_{k'}) = MAR_n - \delta MAR_n \\ MAR'_{n+1} &= MAR'_n \times (1 - \rho_n) + \rho_n \alpha_n \tau_n + \alpha_{n+1} \Delta'_{n+1} \\ \text{sachant que } \Delta'_{n+1} &= \Delta_{n+1} + \delta t \text{ car } t'_{n+1} = t_{n+1} = H \text{ et } t'_n = t_n - \delta t \text{ alors} \\ MAR'_{n+1} &= MAR_{n+1} + \alpha_{n+1} \delta t - \alpha_j \delta t \prod_{k'=j}^n (1 - \rho_{k'}) = MAR_{n+1} + \delta MAR_{n+1} \end{aligned}$$

Il suffit de trouver $\delta t > 0$ qui permet de vérifier $MAR'_{max} \leq MAR_{max} = MAR_j$

Comme $MAR'_k = MAR_k \forall k \in \{1, \dots, j-1\}$ et $\delta MAR_k > 0 \forall k \in \{j, \dots, n\}$ alors

$$\begin{aligned} MAR'_{max} &= \max \{MAR'_1; MAR'_j; MAR'_{n+1}\} \\ &= \max \{MAR_1; MAR_j - \delta MAR_j; MAR_{n+1} + \delta MAR_{n+1}\} \end{aligned}$$

Deux cas se présentent :

Cas 1 Si $\alpha_{n+1} - \alpha_j \delta t \prod_{k'=j}^n (1 - \rho_{k'}) \leq 0$

$$\text{Il suffit de choisir } \delta t \geq \frac{MAR_{max} - MAR_1}{\alpha_j}$$

Cas 2 Si $\alpha_{n+1} - \alpha_j \delta t \prod_{k'=j}^n (1 - \rho_{k'}) > 0$

$$\text{Il suffit de choisir } \delta t \leq \frac{MAR_{max} - MAR_1}{\alpha_j \left(1 - \prod_{k'=j}^n (1 - \rho_{k'})\right) + \alpha_{n+1}}$$

■

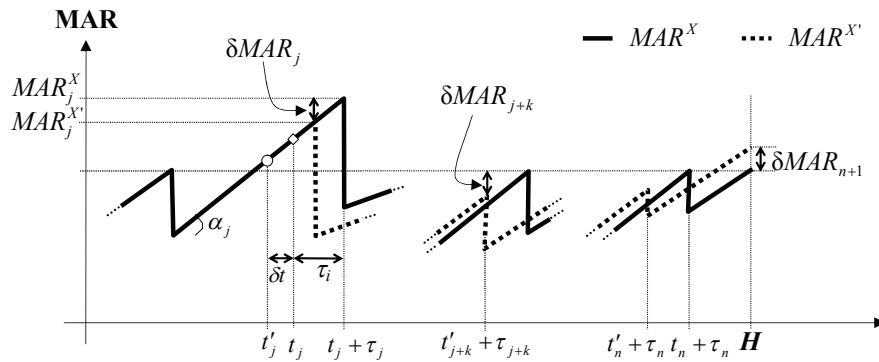


FIGURE C.3 – MAR^x et $MAR^{x'}$

5 Preuve du Corollaire 1

Pour une meilleure clarté, et sans perte de généralité, les indices relatifs à l'outil et au mode de défaillance sont omis dans cette démonstration.

Nous avons choisi de démontrer l'équation 1 par la méthode de récurrence.

1. L'équation est vérifiée pour $i = 1$ car $t_0^* = 0$ et $\rho_0 = 1$

2. Supposons que la formule est valide pour $i < n$ quelconque

$$t_i^* = t_1^* \left(1 + \alpha_0 \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} \right) - \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{1}{\alpha_{i'}} \left(\pi_{i'} + \alpha_{i'} \Delta \tau_{i'+1} \right) + \alpha_0 \tau_1 \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}}$$

Avec

$$\pi_{i'} = \tau_{i'} \rho_{i'} \alpha_{i'-1}$$

$$\Delta \tau_{i'+1} = \tau_{i'+1} - \tau_{i'}$$

3. Démontrons que la formule reste valable pour $j = i + 1$

En utilisant la propriété 4 on a :

$$MAR_j^* = \frac{1}{\rho_{j-1}} \left(\pi_{j-1} + \alpha_{j-1} \times (t_j^* + \tau_j - t_{j-1}^* - \tau_{j-1}) \right) \quad (A)$$

Sachant que

$$MAR_j^* = MAR_{j-1}^* = MAR_i^* = MAR_1^* = \alpha_0 t_1^* + \alpha_0 \tau_1 \text{ et } t_{j-1}^* = t_i^*$$

l'équation (A) devient

$$\alpha_0 t_1^* + \alpha_0 \tau_1 = \frac{1}{\rho_{j-1}} (\pi_{j-1} + \alpha_{j-1} (\tau_j - \tau_{j-1})) + \frac{\alpha_{j-1}}{\rho_{j-1}} t_j^* - \frac{\alpha_{j-1}}{\rho_{j-1}} t_i^*$$

Ainsi, l'expression de t_j^* est obtenu comme suit :

$$\begin{aligned} t_j^* &= \frac{\rho_{j-1} \alpha_0}{\alpha_{j-1}} t_1^* + t_1^* \left(1 + \alpha_0 \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} \right) - \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{1}{\alpha_{i'}} (\tau_{i'} \rho_{i'} \alpha_{i'-1} + \alpha_{i'} (\tau_{i'+1} - \tau_{i'})) \\ &\quad + \alpha_0 \tau_1 \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} + \frac{\rho_{j-1}}{\alpha_{j-1}} \alpha_0 \tau_1 - \frac{1}{\alpha_{j-1}} (\tau_{j-1} \rho_{j-1} \alpha_{j-2} + \alpha_j (\tau_j - \tau_{j-1})) \\ &= t_1^* \left(\frac{\rho_{j-1} \alpha_0}{\alpha_{j-1}} + 1 + \alpha_0 \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} \right) - \sum_{i'=1}^{i-1} \frac{1}{\alpha_{i'}} (\tau_{i'} \rho_{i'} \alpha_{i'-1} + \alpha_{i'} (\tau_{i'+1} - \tau_{i'})) \\ &\quad - \frac{1}{\alpha_{j-1}} (\tau_{j-1} \rho_{j-1} \alpha_{j-2} + \alpha_j (\tau_j - \tau_{j-1})) + \alpha_0 \tau_1 \left(\sum_{i'=1}^{i-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} + \frac{\rho_{j-1}}{\alpha_{j-1}} \right) \\ &= t_1^* \left(1 + \alpha_0 \sum_{i'=1}^{j-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} \right) - \sum_{i'=1}^{j-1} \frac{1}{\alpha_{i'}} (\tau_{i'} \rho_{i'} \alpha_{i'-1} + \alpha_{i'} (\tau_{i'+1} - \tau_{i'})) \\ &\quad + \alpha_0 \tau_1 \sum_{i'=1}^{j-1} \frac{\rho_{i'}}{\alpha_{i'}} \blacksquare \end{aligned}$$

6 Preuve du Corollaire 2

Le corollaire 1 est valide pour $t_{n_z+1}^* = H_z$, ce qui permet de déterminer l'expression de $t_{1_z}^*$ comme suit :

$$\begin{aligned}
 t_{n_z+1}^* = H_z &= t_{1_z}^* \left(1 + \alpha_{(0_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho_{(i_z, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}} \right) - \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\pi_{(i_z, j_z)} + \alpha_{(i_z, j_z)} \Delta \tau_{(i_z+1, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}} \\
 &\quad + \alpha_{(0_z, j_z)} \tau_{(1_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho_{(i_z, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}} \\
 \Rightarrow t_{1_z}^* &= \frac{H_z + \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\pi_{(i_z, j_z)} + \alpha_{(i_z, j_z)} \Delta \tau_{(i_z+1, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}} - \alpha_{(0_z, j_z)} \tau_{(1_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho_{(i_z, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}}}{1 + \alpha_{(0_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho_{(i_z, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}}}
 \end{aligned}$$

Sachant que dans un plan de surveillance optimal on a

$$MAR_{max(z, j_z)}^* = Cte_{(z, j_z)} \quad \forall z \in \mathcal{Z} \quad \forall j_z \in \{j \in \Lambda \mid \delta_{(i, j)} \times qpt_{(i, z)} = 1; i \in \mathcal{I}\}$$

alors

$$MAR_{max(z, j_z)}^* = MAR_{1_z, z, j_z}^* = \alpha_{0_z, j_z} (t_{1_z}^* + \tau_{(1_z, j_z)})$$

$$\Rightarrow MAR_{max(z, j_z)}^* =$$

$$\alpha_{(0_z, j_z)} \left(\frac{H_z + \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\pi_{(i_z, j_z)} + \alpha_{(i_z, j_z)} \Delta \tau_{(i_z+1, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}} - \alpha_{(0_z, j_z)} \tau_{(1_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho_{(i_z, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}}}{\left(1 + \alpha_{(0_z, j_z)} \sum_{i_z=1}^{n_z} \frac{\rho_{(i_z, j_z)}}{\alpha_{(i_z, j_z)}} \right)} + \tau_{(1_z, j_z)} \right) \blacksquare$$

CONCEPTION ET ÉVALUATION DES PLANS DE SURVEILLANCE BASÉS SUR LE RISQUE

Limitation des incertitudes qualité avec des ressources limitées de maîtrise

RÉSUMÉ : La compétitivité d'une entreprise est conditionnée par l'aptitude de son organisation de trouver des solutions pour améliorer l'efficacité de son processus de fabrication en maîtrisant sa variabilité tout en garantissant des coûts bas, des délais réduits et, parfois, une certaine capacité de produire à des grands volumes. La maîtrise du processus de fabrication est un ensemble d'activités réalisées par un processus opérationnel de contrôle en suivant un plan de surveillance souvent préétabli avec des objectifs précis en termes de maîtrise des risques. La mise en application du plan de surveillance est souvent mise à mal par : les aléas liés aux flux physiques et informationnels, l'interaction du processus de contrôle avec d'autres processus opérationnels de l'entreprise et les limitations en ressources de mesure. Cette thèse apporte des éléments de réponse à cette problématique en proposant des approches nouvelles pour la conception des plans de surveillance. Pour cela, une approche assurantielle permet de définir un plan de surveillance qui limite l'exposition aux risques et optimise l'utilisation des ressources de mesure. Une formalisation simplifiée a permis d'expliquer cette approche à travers des exemples. Les résultats des expérimentations sur un cas industriel, montrent l'intérêt de l'approche pour la maîtrise des risques opérationnels dans un processus de fabrication. Par la suite, une formalisation généralisée de l'approche a été proposée pour concevoir le plan de surveillance généralisé d'un processus disposant d'un ensemble des moyens de contrôle interposé sur plusieurs couches le long du processus qui est assujéti à multiples risques.

Mots clés : *Plan de surveillance, Maîtrise des risques, Allocation des inspections, Capacité, Performances.*

DESIGN AND EVALUATION OF RISK BASED CONTROL PLANS Limitation of Quality uncertainty with limited control resources

ABSTRACT : The competitiveness of a company depends on its organization ability to improve the efficiency of the manufacturing process by controlling its variability while maintaining low costs, reduced delays and, sometimes, a certain capacity to produce at high volumes. Process monitoring is a set of activities performed by an operational process of control according to the control plan which is predetermined with specific goals in terms of risk control. The implementation of the control plan is often undermined by : the uncertainties associated with physical and informational flows, the interaction of the control process with other operational processes and the limitations of control resources. The objective of this thesis was to address this problem by proposing new approaches to the design of control plans. For this, we propose an approach for defining an insurance-based control plan that limits exposure to risk and optimizes control resources utilization. A simplified formalization has allowed explaining this approach through examples. The results of experiments, done on an industrial case study, demonstrate the value of the approach for operational risk management in a manufacturing process. Subsequently, a generalized formalization of the approach has been proposed to design the control plan of a generalized process with a set of control resources interposed in several layers along the process which is subject to multiple risks.

Keywords : *Control plan, Risks monitoring, Inspection allocation, Capability, Capacity, Performances.*